



Guillaume dos Santos

**Análise do comportamento mecânico de
componentes produzidos por Fabrico por Filamento
Fundido**



Guillaume dos Santos

**Análise do comportamento mecânico de
componentes produzidos por Fabrico por Filamento
Fundido**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Victor Fernando Santos Neto, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Maria Alexandra Lopes da Fonseca, Investigadora em Pós-doutoramento do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Joaquim Alexandre Mendes de Pinho da Cruz

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor José Martinho Marques de Oliveira

Professor Coordenador S/ Agregação da Universidade de Aveiro (arguente)

Prof. Doutor Victor Fernando Santos Neto

Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço em primeiro lugar aos meus orientadores Professor Doutor Victor Neto, Doutora Maria Alexandra e Professor Doutor João Oliveira tanto pela disponibilidade prestada ao longo da Dissertação como pelos conselhos concedidos e a frequente boa disposição.

À empresa BEEVERYCREATIVE não só pela colaboração mas também pela elevada disponibilidade e interesse mostrado, em especial ao Eng^o. Marcos Gomes pelo acompanhamento regular e ajuda prestada.

A todos os meus colegas de curso, que acompanharam o presente trabalho de forma mais próxima, pelo apoio dado a todos os níveis.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio prestado.

Por fim, mas não menos importantes, um agradecimento especial aos meus pais pelos esforços e apoio incondicional.

Palavras-chave

Fabrico por Filamento Fundido (FFF); Ácido Polilático (PLA); Parâmetros de impressão; Modelos de previsão; Taguchi.

Resumo

Com o aparecimento das diversas tecnologias de fabrico aditivo, são várias as possíveis aplicações destes processos para satisfazer as necessidades tanto a nível industrial como a nível pessoal. Um dos processos mais utilizados denomina-se por Fabrico por Filamento Fundido (FFF), e consiste na deposição de material fundido em sucessivas camadas, material esse que se encontra em forma de filamento armazenado em bobines. Apesar do Ácido Polilático (PLA) e do Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) serem os materiais mais utilizados atualmente, o uso de Poli(éter éter cetona) (PEEK), Policarbonato (PC), Acetato de Polivinilo (PVA) e Poliamida (PA) também é possível. Devido à pequena lista de materiais usados, vários estudos têm sido feitos com o intuito de conseguir materiais com melhores propriedades, como é o caso de matrizes poliméricas reforçadas com nanopartículas. Outra forma de conseguir uma melhoria nas propriedades das peças impressas passa pela análise feita aos parâmetros com influência existentes durante o processo. Espessura e largura do material depositado, ângulo de preenchimento e percentagem de preenchimento, são parâmetros avaliados na presente dissertação. Além da análise feita aos parâmetros, também é aferida a adequação de modelos de previsão para as propriedades finais das peças, sendo ainda abordado o uso de redes neurais artificiais nessa previsão.

Keywords

Fused Filament Fabrication (FFF); Polylactic Acid (PLA); Process parameters; Forecasting models; Taguchi.

Abstract

With the emergence of various additive manufacturing technologies, there are several possible applications of these processes to meet the needs at both the industrial and personal level. One of the most widely used technologies is called Fused Filament Fabrication (FFF), and consists in the deposition of molten material in successive layers. The material is in the form of filament stored in spools. Although Polylactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) are the materials most widely used, the use of Polyether ether ketone (PEEK), Polycarbonate (PC), Polyvinyl Acetate (PVA) and Polyamide (PA) is also possible. Due to the short list of materials used, several studies have been carried out in order to obtain materials with better properties, such as polymer matrix reinforced with nanoparticles. Another way to achieve an improvement in the properties of printed parts is by the analysis of the influential parameters existing in the process. Layer thickness, raster width, raster angle and infill are parameters evaluated in this dissertation. In addition to the analysis made to the parameters it was also assessed the adequacy of forecasting models for the final properties of the part, being also addressed the use of artificial neural networks for forecast.

Índice

I	Enquadramento e Revisão da Literatura	1
1	Introdução	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	Manufatura Aditiva	5
2.1	Prototipagem Rápida	6
2.2	Tecnologias de Fabrico	7
2.2.1	Estereolitografia	10
2.2.2	Sinterização/Fusão Seletiva por Laser	12
2.2.3	Impressão 3D	13
2.2.4	<i>Robocasting</i>	14
3	Fabrico por Filamento Fundido	15
3.1	Funcionamento	15
3.2	Vantagens e Desvantagens	16
3.3	Materiais Utilizados	17
3.4	Parâmetros de Impressão	18
4	Modelos de Previsão	27
4.1	Modelos Analíticos	27
4.1.1	Lei das Misturas	27
4.1.2	Modelos de Previsão para Materiais Celulares	29
4.2	Redes Neurais Artificiais	31
II	Parte Experimental	33
5	Componente Experimental	35
5.1	Parâmetros Estudados	35
5.2	Material Utilizado	37
5.3	Impressora e Software Utilizados	38
5.4	Testes e Normas	38
5.4.1	Testes de Tração	38
5.4.2	Norma ISO 527-2:1996	39
5.5	Procedimento	41

5.6	Aplicação dos Modelos de Previsão	46
5.6.1	Modelos Analíticos	46
5.6.2	Redes Neurais Artificiais	47
III	Resultados e Discussão	51
6	Resultados Experimentais e Discussão	53
6.1	Orientação	53
6.2	Camadas Envolventes	55
6.3	Método de Taguchi preliminar	57
6.3.1	Resistência à Tração	59
6.3.2	Deformação de Rutura	60
6.3.3	Módulo de Young	61
6.4	Combinações Extra para Análise Individual	63
6.5	Método de Taguchi revisto	67
6.5.1	Resistência à Tração	69
6.5.2	Deformação de Rutura	70
6.5.3	Módulo de Young	71
6.6	Análise Geral	73
6.7	Comparação das Propriedades Mecânicas Obtidas (Injeção/FFF)	75
6.8	Porcentagem de Preenchimento Real	76
6.9	Modelos de Previsão	78
6.9.1	Lei das Misturas	78
6.9.2	Modelos de Previsão para Materiais Celulares	80
6.9.3	Redes Neurais Artificiais	82
7	Conclusões	85
7.1	Comentários Finais	85
7.2	Trabalhos Futuros	86
A	Gráficos de Tensão-Deformação para Diferentes Ângulos de Orientação	95
B	Desenho Esquemático Relativo às Camadas Envolventes dos Provetes	97
C	Análise do Método de Taguchi	99
C.1	Valor Médio de Cada Nível	100
C.1.1	Combinações com 0,1 mm de Espessura da Camada	100
C.1.2	Combinações com 0,2 mm de Espessura da Camada	101
C.1.3	Combinações com 0,3 mm de Espessura da Camada	101
C.1.4	Combinações com 0°	102
C.1.5	Combinações com -45°/45°	102
C.1.6	Combinações com 0°/90°	103
C.1.7	Combinações com 0,4 mm de Largura da Camada	103
C.1.8	Combinações com 0,48 mm de Largura da Camada	104
C.1.9	Combinações com 0,56 mm de Largura da Camada	104
C.1.10	Combinações com 20% de Preenchimento	105
C.1.11	Combinações com 60% de Preenchimento	105

C.1.12	Combinações com 100% de Preenchimento	106
C.2	Soma do Valor Quadrado dos Parâmetros	106
C.3	Soma Total dos Quadrados	108
C.4	Contribuição Percentual	108
C.5	Valor Próximo do Nível Ideal	109
C.5.1	Resistência à Tração	110
C.5.2	Deformação de Rutura	111
C.5.3	Módulo de Young	112
C.6	Teste ANOVA (Análise da Variância)	113
C.7	Teste de Confirmação	114
D	Combinações Impressas e Respetivos Tempos	117

Lista de Tabelas

2.1	Sumário de estudos realizados com tecnologias de MA.	8
3.1	Tabela comparativa entre o PLA e o ABS.	18
3.2	Parâmetros relacionados com o processo, material e máquina de impressão.	19
3.3	Resumo de observações gerais retiradas de estudos realizados por diferen- tes autores.	25
5.1	Parâmetros estudados e respetivos níveis.	36
5.2	Matriz ortogonal L9 do método de Taguchi preliminar.	36
5.3	Especificações do filamento de PLA.	37
5.4	Valores pré-definidos - Orientação.	43
5.5	Orientação e ângulo de preenchimento.	44
5.6	Combinações extras impressas.	45
5.7	Matriz do método de Taguchi revisto.	45
5.8	Percentagem de amostras para treino, validação e teste.	48
6.1	Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young – Orientação.	53
6.2	Matriz ortogonal L9 do método de Taguchi preliminar.	57
6.3	Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as diferentes combinações.	57
6.4	Parâmetros ideais – Resistência à tração (CR).	59
6.5	Parâmetros ideais – Deformação de rutura (CD).	60
6.6	Parâmetros ideais – Módulo de Young (CMY).	61
6.7	Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young, para as combinações ótimas.	62
6.8	Combinações extras impressas.	63
6.9	Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações extra.	63
6.10	Combinações utilizadas na análise individual.	65
6.11	Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações consideradas.	65
6.12	Matriz do método de Taguchi revisto.	66
6.13	Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações revistas.	67
6.14	Parâmetros ideais – Resistência à tração (CBR).	69
6.15	Parâmetros ideais – Deformação de rutura (CBD).	70
6.16	Parâmetros ideais – Módulo de Young (CBMY).	71

6.17 Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young – Combinações revistas ótimas.	72
6.18 Comparação geral das análises.	73
6.19 Fração volúmica real – Análise da largura.	73
6.20 Resistência à tração, Deformação de rutura e Módulo de Young – Provetes injetados.	75
6.21 Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young – FFF vs Injeção.	75
6.22 Percentagem de preenchimento real dos provetes da Figura 5.12.	76
6.23 Percentagem de preenchimento real das combinações da Tabela 5.2.	77
6.24 Fração volúmica das combinações do método de Taguchi preliminar.	78
6.25 Comparação entre os valores previstos pela lei das misturas e os obtidos.	78
6.26 Densidades das combinações do método de Taguchi preliminar.	80
6.27 Comparação entre os valores teóricos dos modelos de materiais celulares e os obtidos.	81
C.1 Matriz ortogonal L9.	99
C.2 Valores de resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young, para diferentes combinações.	99
C.3 Combinações para os provetes com 0,1 mm de espessura.	100
C.4 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,1 mm de espessura.	100
C.5 Combinações para os provetes com 0,2 mm de espessura.	101
C.6 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,2 mm de espessura.	101
C.7 Combinações para os provetes com 0,3 mm de espessura.	101
C.8 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,3 mm de espessura.	101
C.9 Combinações para os provetes com 0° de ângulo de preenchimento.	102
C.10 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0° de ângulo de preenchimento.	102
C.11 Combinações para os provetes com -45°/45° de ângulo de preenchimento.	102
C.12 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com -45°/45° de ângulo de preenchimento.	102
C.13 Combinações para os provetes com 0°/90° de ângulo de preenchimento.	103
C.14 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0°/90° de ângulo de preenchimento.	103
C.15 Combinações para os provetes com 0,4 mm de largura.	103
C.16 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,4 mm de largura.	103
C.17 Combinações para os provetes com 0,48 mm de largura.	104
C.18 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,48 mm de largura.	104
C.19 Combinações para os provetes com 0,56 mm de largura.	104
C.20 Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,56 mm de largura.	104
C.21 Combinações para os provetes com 20% de preenchimento.	105

C.22	Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 20% de preenchimento.	105
C.23	Combinações para os provetes com 60% de preenchimento.	105
C.24	Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 60% de preenchimento.	105
C.25	Combinações para os provetes com 100% de preenchimento.	106
C.26	Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 100% de preenchimento.	106
C.27	Soma do valor quadrado da espessura da camada, ângulo de preenchimento, largura da camada e percentagem de preenchimento.	107
C.28	Soma total dos quadrados.	108
C.29	Contribuição percentual das variáveis.	108
C.30	Valores próximo do ideal – Resistência à tração (CR).	110
C.31	Valores próximo do ideal – Deformação de rutura (CD).	111
C.32	Valores próximo do ideal – Módulo de Young (CMY).	112
C.33	Valor F calculado para as diferentes variáveis para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young.	114
C.34	Valor estimado ótimo para resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young.	115
D.1	Combinações preconizadas e respetivos tempos de impressão.	117

Lista de Figuras

2.1	Diversos fins dos processos de MA em 2013	6
2.2	Diferentes processos de manufatura aditiva	9
2.3	Efeito do refinamento da malha de triângulos na forma final da peça[16].	9
2.4	Desenho esquemático do processo de Estereolitografia – SL	11
2.5	Superfície de duas peças produzidas pelos processos: (a) SLA® e seme- lhantes, (b) CLIP®.	11
2.6	Desenho esquemático do processo de Sinterização Seletiva a Laser – SLS	13
2.7	Desenho esquemático do processo 3DP	14
2.8	Desenho esquemático do processo Robocasting [34].	14
3.1	Desenho esquemático do processo Fabrico por Filamento Fundido – FFF	16
3.2	Materiais utilizados na tecnologia FFF.	18
3.3	Parâmetros relacionados com o processo de FFF	19
3.4	Possíveis valores de espaços vazios (<i>air gap</i>) entre dois filamentos adja- centes depositados [50].	20
3.5	Exemplo de diferentes referenciais possíveis de utilizar [51].	20
4.1	Representação da Lei das Misturas: (a) modelo de Voigt (paralelo), (b) modelo de Reuss (série).	28
4.2	Espumas: (a) estrutura de células abertas, (b) estrutura de células fecha- das [66].	29
4.3	Exemplo de uma Rede Neuronal Artificial	31
5.1	Parâmetros estudados: (a) Orientação, (b) Espessura da camada, (c) Lar- gura da camada, (d) Ângulo de preenchimento e Espaços vazios.	35
5.2	Referencial e orientações utilizadas.	37
5.3	Impressora BEETHEFIRST+ [75].	38
5.4	Software e procedimento.	38
5.5	Máquina dos ensaios de tração, modelo Shimadzu AGS-X.	39
5.6	Provete do tipo 5A da norma ISO 527-2:1996 [78].	40
5.7	Mudança de filamento.	41
5.8	Procedimento para colocação o filamento: (a) Aquecimento do bico ex- trusor, (b) Remoção/Inserção do filamento.	41
5.9	Calibração.	42
5.10	Procedimento para calibrar a impressora: (a) Altura da mesa, (b) Nível da mesa, (c) Teste de calibração.	42
5.11	Câmara climática, modelo TIRAclima TCC 4034.	43

5.12	Provetes com 20% de preenchimento: (a) Ângulo 0°, (b) Ângulo 45°, (c) Ângulo 90°	44
5.13	Provetes impressos a 30°	45
5.14	Considerações para os modelos de previsão para materiais celulares: (a) Estrutura aberta, (b) Estrutura fechada.	47
5.15	<i>Neural Network Start</i> (nnstart) [79].	48
5.16	Rede Neuronal com 4 inputs, 3 outputs e 5 camadas ocultas.	49
6.1	(a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young, em função da orientação.	54
6.2	Curva Tensão-Deformação para uma orientação de 90°.	55
6.3	Instabilidades existentes nos provetes: (a) Ângulo 0°, (b) Ângulo 45°, (c) Ângulo 90°.	55
6.4	Curva Tensão-Deformação do provete com ângulo de preenchimento 0°.	56
6.5	Desenho esquemático do efeito das camadas envolventes.	56
6.6	(a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young e respectivos desvios para as diferentes combinações.	58
6.7	Resistência à tração: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.	59
6.8	Deformação de rutura: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.	60
6.9	Módulo de Young: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.	61
6.10	(a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young e respectivos desvios para as combinações extra.	64
6.11	(a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young e respectivos desvios, para as combinações revistas.	68
6.12	Resistência à tração: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada.	69
6.13	Deformação de rutura: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada.	70
6.14	Módulo de Young: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada.	71
6.15	Distribuição das camadas interiores – Largura: (a) Combinação C1 (0,4 mm), (b) Combinação C11 (0,56 mm), (c) Combinação CB1 (0,4 mm), (d) Combinação CL (0,56 mm).	74
6.16	Dispersão dos valores para o módulo de Young obtidos através da aplicação do Modelo de Voigt.	79
6.17	Comparação dos valores de módulo de Young obtidos e os previstos, através do Modelo de Voigt.	80
6.18	Dispersão dos valores para o módulo de Young obtidos através da aplicação dos modelos de materiais celulares.	81
6.19	Comparação dos valores de módulo de Young obtidos e os previstos, através dos modelos de materiais celulares.	81
6.20	Gráficos de regressão.	82
6.21	Histograma de erro.	83

6.22	Comparação dos valores obtidos experimentalmente e os previstos através da RNA: (a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young.	84
A.1	Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de tração realizados para provetes impressos seguindo diferentes orientações: (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 90°.	96
B.1	Desenho esquemático do fluxo experimental realizado.	98
C.1	Efeito dos diferentes níveis na Resistência à tração: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.	110
C.2	Efeito dos diferentes níveis na Deformação de rutura: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.	111
C.3	Efeito dos diferentes níveis no Módulo de Young: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.	112

Parte I

Enquadramento e Revisão da Literatura

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Nunca o mercado foi tão competitivo e global, em que as exigências dos consumidores são cada vez maiores. Alguns fatores que são de extrema importância e decisivos para a sobrevivência de uma empresa são o tempo de resposta às solicitações do mercado e a redução de quaisquer desperdícios, nomeadamente desperdícios de material. Por forma a diminuir o tempo de resposta, é imperativo diminuir o tempo de produção, sendo constante a procura de novas tecnologias de produção que permitam garantir uma vantagem competitiva face à concorrência. Exemplo de tal é a crescente aposta em tecnologias de fabrico aditivo, visto que permitem que as empresas transformem de forma rápida e eficiente ideias inovadoras em produtos finais. Existem várias vantagens associadas a este tipo de tecnologias, tal como a capacidade de produzir modelos tridimensionais complexos e detalhados. Além destas tecnologias conseguem responder às necessidades específicas dos clientes de forma rápida, com o uso das mesmas torna-se possível produzir qualquer peça *in situ*, diminuindo assim os gastos relativos ao transporte. Contudo, e apesar destas tecnologias estarem a ganhar espaço a nível industrial, a implementação de algumas tecnologias ainda se encontra limitada por vários fatores, tais como os materiais utilizados, uma vez que as suas propriedades mecânicas ainda não são completamente satisfatórias. A solução deste problema passa pelo desenvolvimento de novos materiais, nomeadamente através da adição de nanopartículas. Outra abordagem que tem vindo a ser seguida passa pela otimização do próprio processo de fabrico, fazendo um ajuste adequado dos diferentes parâmetros do processo, por forma a melhorar as propriedades mecânicas do produto final. Uma das tecnologias aditivas existentes denomina-se por Fabrico por Filamento Fundido (FFF), que consiste na deposição de sucessivas camadas de material fundido, sendo das tecnologias mais conhecidas atualmente.

1.2 Objetivos

Os objetivos principais da presente dissertação focam-se na análise da influência dos parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas das peças finais impressas, e no estudo de modelos de previsão a fim de prever as propriedades mecânicas finais. Estes objetivos assentam em três pilares essenciais:

1. Aferir os principais parâmetros de influência no processo de Fabrico por Filamento Fundido: Esses parâmetros podem relacionar-se com o próprio equipamento, com o material e com o processo.
2. Caracterizar as propriedades mecânicas das peças impressas (resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade).
3. Estudar modelos de previsão para as propriedades mecânicas das peças impressas, por forma a perceber quais os modelos de previsão que se adequem a prever as propriedades mecânicas finais.

1.3 Estrutura da Dissertação

O documento encontra-se dividido em três partes: Revisão da Literatura, Parte Experimental e, Resultados e Discussão.

Os capítulos dois, três e quatro, são dedicados aos conceitos teóricos e estão incluídos na parte de Revisão da Literatura. O capítulo dois diz respeito aos conceitos de manufatura aditiva e explica o funcionamento das tecnologias de fabrico aditivo mais conhecidas. O capítulo três é dedicado à tecnologia de Fabrico por Filamento Fundido (FFF), aos materiais normalmente utilizados e aos parâmetros de impressão. A primeira parte termina com o capítulo quatro, que identifica os modelos analíticos utilizados na previsão das propriedades mecânicas, inclusive as redes neuronais artificiais.

A Parte Experimental está descrita no capítulo cinco. Neste capítulo são descritos todos os aspetos relacionados com o procedimento experimental, tais como as combinações de parâmetros utilizadas para impressão das amostras, o material utilizado, equipamento e as propriedades mecânicas estudadas. A aplicação prática dos modelos de previsão referidos e o procedimento efetuado também podem ser encontrados neste capítulo.

Por fim, na Parte Resultados e Discussão, mais precisamente no capítulo seis, são apresentados e discutidos todos os resultados experimentais obtidos. Comentários finais e trabalhos futuros são os tópicos referentes ao capítulo sete.

Capítulo 2

Manufatura Aditiva

Manufatura Aditiva, Fabrico Aditivo, Processo Aditivo, Fabrico por camadas e Fabrico com forma livre. Apesar de existirem várias maneiras de denominar o processo, todas significam o mesmo. A *American Society for Testing and Materials*, ASTM, define a Manufatura Aditiva (MA) como sendo um processo de junção de materiais, normalmente por deposição de várias camadas, para produzir objetos a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador (Computer Aided Design 3D) [1]. Existem várias vantagens associadas a este tipo de processo, tais como a capacidade de produzir modelos tridimensionais complexos e detalhados, até mesmo com contra saídas, algo praticamente impossível de obter através de processos subtrativos. A flexibilidade para produzir diferentes peças a partir do projeto 3D, sem a necessidade de ferramentas típicas, tais como moldes, é igualmente uma das vantagens da MA no que toca à produção de pequenas séries. É incorreto pensar em utilizar as tecnologias de fabrico rápido com o propósito de substituir tecnologias como a injeção ou extrusão, visto serem tecnologias distintas com objetivos diferentes. Tecnologias de injeção têm como objetivo produzir em grandes séries, enquanto que a manufatura aditiva deve tirar partido do facto de conseguir responder às necessidades específicas dos clientes de forma rápida e para produção de pequenas quantidades. Com o uso dos processos aditivos, produzir qualquer peça *in situ* tornou-se uma realidade, diminuindo os gastos relativos ao transporte. Este tipo de manufatura tem crescido de forma acelerada em áreas como a indústria automóvel, setores aeroespaciais e a indústria médica, onde já é utilizada para a criação de próteses personalizadas e implantes [2]. Estudos apontam que em 2032 será possível utilizar este tipo de processos para a produção de órgãos humanos. No entanto a velocidade de construção lenta, a pouca diversidade de materiais disponíveis e as estruturas menos resistentes, quando comparadas com estruturas obtidas por outros processos, são algumas das barreiras que a manufatura aditiva precisa superar [3].

O que se conhece atualmente como manufatura aditiva teve início na década de 1980, quando era mais conhecida como prototipagem rápida [4]. Ao longo dos anos o nome foi redefinindo-se, e o termo manufatura aditiva, mais amplo, tem vindo a ser utilizado englobando tanto a filosofia de fabrico como as diferentes tecnologias desenvolvidas. Esta redefinição deveu-se à evolução das peças impressas, visto que no início eram apenas protótipos com a principal função de materializar novos conceitos/design. No entanto, com o aumento da precisão e das propriedades dos materiais utilizados, as peças impressas começaram a fazer parte de montagens e a ser possível as suas utilizações diretamente

como peça final. Prova disso foi um estudo realizado pela *Wohlers Associates, Inc.* [5] em que analisaram os diferentes fins dos processos de manufatura aditiva na indústria em todo o mundo, no ano de 2013. Perceberam que várias peças obtidas por fabrico aditivo eram utilizadas como modelos funcionais (29%), sendo apenas 8,7% das peças impressas relativas a fins de prototipagem rápida. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 2.1.

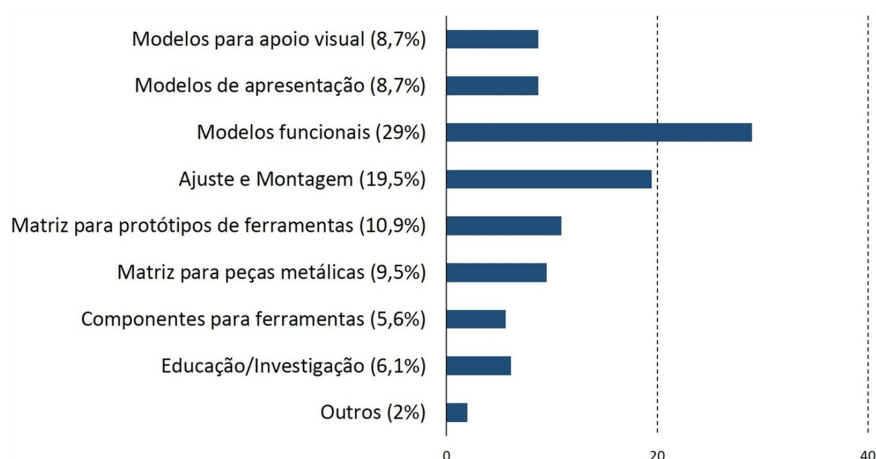


Figura 2.1: Diversos fins dos processos de MA em 2013. Adaptado de [6].

2.1 Prototipagem Rápida

A prototipagem rápida é denominada, pela ASTM, como sendo o fabrico aditivo de um projeto, por vezes iterativo, para testes funcionais, de forma ou de ajuste, ou combinação destes [1].

Este método possibilita a criação de protótipos recorrendo a um projeto CAD, de uma forma simples e rápida, proporcionando ao cliente uma melhor perceção do produto final e a oportunidade de avaliar a funcionalidade do produto. Outra vantagem deste processo é a grande versatilidade de forma que apresenta, levando a menos falhas na produção que, por sua vez, permite que os produtos finais apresentem qualidade superior. Os protótipos assim obtidos podem ser utilizados para fins educativos para uma melhor compreensão; por médicos que podem utilizar modelos impressos de membros humanos com danos para uma correta análise e planeamento do procedimento mais adequado; por empresas que podem verificar qual a reação do mercado a um novo produto, entre outras utilizações [3].

No entanto, convém relembrar a existência de tecnologias subtrativas utilizadas também para prototipagem, *i.e.*, tecnologias onde o modelo é obtido por maquinaria a partir de um bloco de material maciço. Um exemplo é a maquinaria CNC (Comando Numérico Computorizado), onde se pode utilizar vários materiais. Uma das maiores vantagens da Prototipagem Rápida Subtrativa (PRS) é o acabamento preciso possível de conseguir.

2.2 Tecnologias de Fabrico

Existem várias tecnologias de fabrico, cada uma com vantagens e desvantagens, daí ser incorreto identificar alguma das tecnologias como a ideal. Para a escolha apropriada da tecnologia a utilizar na produção de um determinado modelo, é necessário ter em conta vários aspetos como fatores físicos, mecânicos e estéticos, o material que melhor responde às necessidades pretendidas, os custos associados a cada tecnologia e por fim, os prazos para a realização do projeto.

A presença de tecnologias de fabrico aditivo no mundo industrial começa a ser cada vez mais importante, independentemente do sector de atividade. Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo de alguns trabalhos de investigação focados em tecnologias de MA publicados recentemente.

Vários estudos têm recaído nas tecnologias aditivas que processam pós metálicos, exemplo das tecnologias SLM, Fusão Seletiva a Laser, e da Sinterização Direta por Laser de Metal (DMLS), uma vez que permitem reduzir tempos de produção, construir peças mais resistentes e leves quando comparadas com peças obtidas por métodos convencionais. Por forma a perceber melhor as tecnologias referidas, diversos estudos focam-se em analisar a influência de diversos parâmetros, nas propriedades mecânicas das peças impressas [7; 9; 11; 12]. Para utilizar a tecnologia DMLS de forma mais eficiente, Ding *et al.* [13] desenvolveram um sistema automatizado de 8 eixos, com o objetivo de simplificar o planeamento de impressão para peças complexas e reduzir o tempo de produção. Um aspeto interessante que começa a entusiasmar e a despertar curiosidade na indústria de materiais metálicos, é o facto de uma patente relacionada com estes processos aditivos, expirar no fim do ano 2016, levando dessa forma a um maior número de estudos nos processos referidos [14].

Além das tecnologias aditivas para materiais metálicos, a tecnologia FFF também continua a ser alvo de vários estudo, incluindo a sua possível utilização na produção de equipamentos para a saúde [8], ou para uma compreensão mais detalhada de fatores relacionados com o processo [10].

Assim, com as tecnologias de fabrico aditivo a fazerem cada vez mais parte do mundo industrial, torna-se importante perceber detalhadamente o funcionamento dos processos existentes e a influência dos diferentes parâmetros associados, por forma a conseguir potencializar a utilização das mesmas em diversas áreas.

Tabela 2.1: Sumário de estudos realizados com tecnologias de MA.

Tecnologia	Tópico de Investigação	Ano	Referência
SLM ¹	Proposta de um modelo de elementos finitos tridimensional para estudar os efeitos da potência do laser e velocidade de digitalização no comportamento térmico e o mecanismo de fusão durante o processo.	2016	[7]
SLA ² e FDM ³	Potencial utilização de tecnologias de MA para produzir equipamentos personalizados para medicamentos anti-acne.	2016	[8]
SLM	Utilização de Espectroscopia fotoeletrônica de Raios X (XPS) na determinação de elementos químicos à superfície de diferentes amostras.	2016	[9]
FDM	Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos paramétricos para avaliar os efeitos de penetração das camadas na adesão entre as mesmas.	2016	[10]
SLS ⁴	Estudo da influência da espessura da camada, do espaçamento de digitalização e da orientação nas propriedades mecânicas finais.	2017	[11]
SLM	Influência de vários parâmetros na densidade e microdureza e do tratamento térmico nas propriedades mecânicas finais.	2017	[12]
DMLS ⁵	Desenvolvimento de um sistema automatizado com braço robótico de 6 eixos com 2 eixos adicionais para aplicação da tecnologia DMLS.	2017	[13]

¹Fusão Seletiva a Laser; ²Estereolitografia; ³idêntico ao FFF

⁴Sinterização Seletiva a Laser; ⁵Sinterização Direta de Metal a Laser

As técnicas de fabrico de manufatura aditiva podem ser classificadas de diferentes formas. Uma das formas de classificação considera o estado físico inicial do material a utilizar. Assim, é possível diferenciar as técnicas de fabrico em três grupos distintos: quando o material se encontra em pó, no estado líquido ou no estado sólido. Apesar do pó também se encontrar no estado sólido, situa-se numa diferente categoria para abranger todos as tecnologias em que o material se encontra em forma de grão ou pequenas partículas. Quando o material se encontra no estado líquido, este é convertido para o estado sólido através do processo de polimerização, sendo que, tecnologias onde o material utilizado se encontra em forma de fio, rolo, lâminas ou pellets, são classificadas como sendo tecnologias em que o material se encontra no estado sólido [15]. Na Figura 2.2 ilustram-se algumas das técnicas existentes de manufatura aditiva e as suas respectivas categorias.

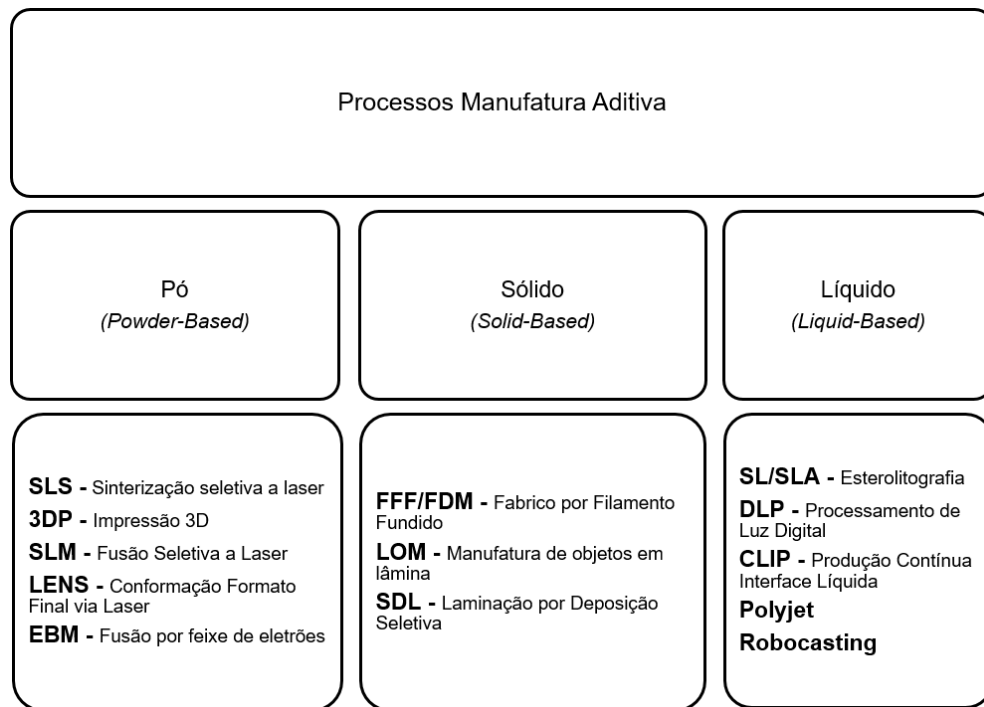


Figura 2.2: Diferentes processos de manufatura aditiva. Adaptado de [15].

Todos os processos começam com a criação do modelo CAD 3D e da conversão do mesmo para formato STL *Standard Tessellation Language*, que representa o modelo através de uma malha constituída por triângulos. O formato do ficheiro STL, foi criado em 1987 pela empresa *3D Systems Inc.* aquando do desenvolvimento da estereolitografia, sendo o formato padrão para todos os processos de manufatura aditiva [6]. Neste formato, o modelo é descrito através de uma malha de triângulos que visa representar de forma simples o formato do modelo a imprimir. Este ficheiro contém as coordenadas cartesianas x , y e z dos nós de cada triângulo, bem como um vetor normal unitário que indica a face exterior do objeto. Quanto menor o tamanho dos triângulos da malha, mais próxima da forma real será, como se apresenta na Figura 2.3 [16].

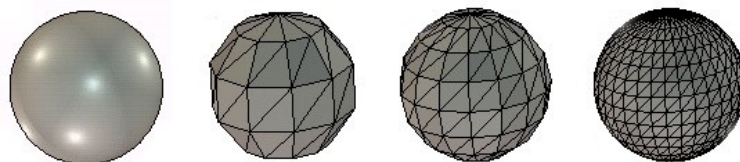


Figura 2.3: Efeito do refinamento da malha de triângulos na forma final da peça[16].

Após definição do ficheiro STL, segue-se a validação do modelo, e eventual correção, uma vez que a malha de triângulos pode não ser gerada da forma correta, levando a posteriores defeitos geométricos do modelo. Depois de corrigido, um programa de pré-processamento prepara o ficheiro STL para a impressão, “fatando” o modelo em várias camadas para serem impressas. O processo de “fatamento” do modelo apresenta alguma imprecisão, existindo a possibilidade de ocorrer o efeito de escada na superfície

da peça. Uma técnica para reduzir este efeito, é criando vários arquivos STL separados e ajustados mais tarde, tendo o cuidado de atribuir à dimensão na direção z um valor múltiplo do valor da espessura da camada. Devido à elevada simplicidade dos arquivos STL, este apenas contém informações sobre a malha da superfície [16]. Com o objetivo de melhorar a qualidade do modelo, foi criado um novo formato de ficheiro, o AMF (*Additive Manufacturing File Format*), que permite obter qualquer informação acerca do material, da cor, entre outras propriedades do objeto a ser impresso [17].

2.2.1 Estereolitografia

A Estereolitografia (SL ou SLA®), desenvolvida pela *3D Systems, Inc.* em 1986, foi a primeira técnica de fabrico rápido a surgir [6]. A SL tem por base a polimerização de uma resina, composta por monómeros fotossensíveis que se aglomeram em cadeias poliméricas através de um feixe de laser ultravioleta. A resina encontra-se numa cuba, com uma plataforma móvel que se desloca na vertical. O laser é direcionado para a resina através de espelhos, para localizações específicas de cada camada, desencadeando uma reação que posteriormente leva à solidificação. Uma vez solidificada, cada camada correspondente a uma secção transversal do modelo 3D. Dependendo da direção em que a plataforma se movimenta, a mesma desce ou sobe uma distância igual ao valor da espessura da camada seguinte, repetindo-se o processo de varrimento laser. Esta espessura depende do equipamento utilizado, mas tipicamente é de 0,025 mm. Devido à elevada viscosidade dos materiais utilizados, é necessário utilizar um nivelador para regularizar a camada de resina líquida. A utilização deste nivelador permite reduzir as imperfeições superficiais do modelo, no entanto tem a desvantagem de aumentar a complexidade do equipamento e o tempo de construção (Fig. 2.4). Quando pronto, o modelo sólido é removido do banho e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para completar a cura. As principais vantagens desta tecnologia passam pela elevada precisão de acabamento e a possibilidade de imprimir peças com dimensões consideravelmente elevadas. O processo SL é bastante utilizado na área de engenharia biomédica para a produção de dispositivos para implantes [18; 20]. Com o desenvolvimento da tecnologia, foi desenvolvida uma nova versão deste processo, com uma maior resolução, denominada microestereolitografia, visando a obtenção de micro-componentes. Este processo permite obter camadas com uma espessura de 0,010 mm [6].

A tecnologia DLP (*Digital Light Processing*) funciona da mesma maneira que o SL, diferenciando-se apenas na fonte de luz utilizada: projetor de alta resolução, que projeta cada camada a ser impressa. Este aspeto permite que as peças impressas por DLP tenham um menor tempo de impressão, em relação ao SLA, visto que é projetada uma camada inteira de cada vez.

Com a expiração de patentes relacionadas com alguns processos existentes, nos últimos anos uma das tecnologias que tem suscitado maior curiosidade nos consumidores denomina-se por produção contínua em interface líquida (*Continuous Liquid Interface Production* – CLIP®), criado pela *Carbon3D, Inc.* [21].

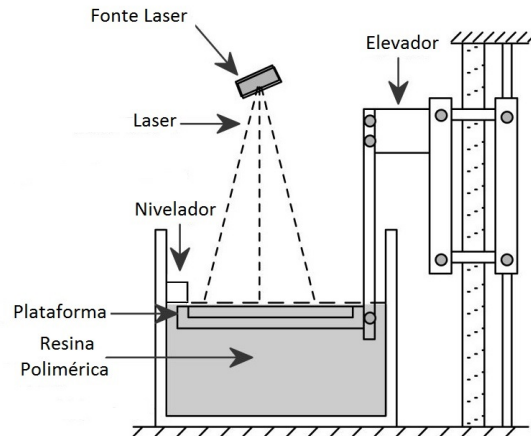


Figura 2.4: Desenho esquemático do processo de Estereolitografia – SL. Adaptado de [19].

O CLIP® é um processo idêntico ao processo de SLA® que, além de utilizar um laser ultravioleta para polimerizar a resina e criar a peça, utiliza também um fluxo controlado de oxigênio com o objetivo de inibir o processo de endurecimento em zonas onde o processo é desnecessário. Este processo diminui a complexidade do equipamento e o tempo de construção do objeto final uma vez que os modelos são produzidos de forma ascendente. A projeção de luz é feita na parte inferior da cuba, que contém uma membrana transparente e permeável ao oxigênio conseguindo criar uma fina camada de resina não curada entre a membrana e o objeto a imprimir. À medida que a resina vai solidificando a plataforma de construção sobe. Além de se obterem tempos de impressão muito inferiores aos do SLA®, a tecnologia CLIP® permite criar peças com maior semelhança às peças fabricadas por injeção, sendo que as propriedades mecânicas não dependem da direção das camadas de impressão [22; 23]. Na Figura 2.5 mostram-se duas imagens de microscopia eletrônica e varrimento da superfície de duas peças produzidas pelos processos (a) SLA® e semelhantes e (b) CLIP®.

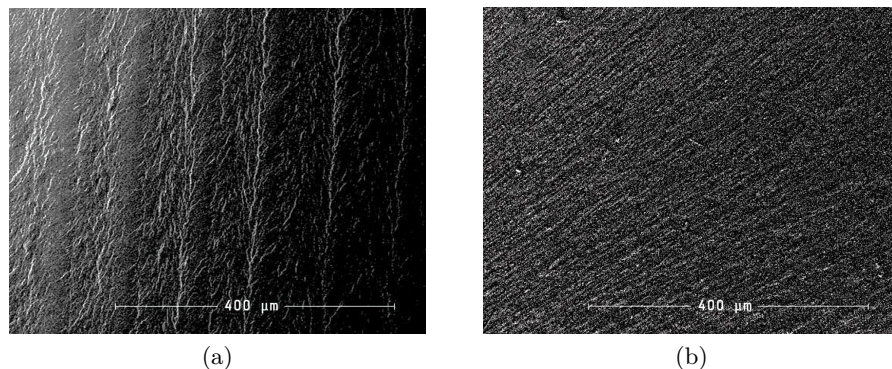


Figura 2.5: Superfície de duas peças produzidas pelos processos: (a) SLA® e semelhantes, (b) CLIP®.

Como se verifica na Figura 2.5, não existe diferenciação das camadas de material depositadas na imagem referente à tecnologia CLIP®. Assim, a anisotropia das peças impressas é menor nesta tecnologia do que nas tecnologias semelhantes, como é o caso do processo SLA®.

2.2.2 Sinterização/Fusão Seletiva por Laser

A Sinterização Seletiva por Laser (do inglês, *Selective Laser Sintering* – SLS) é um processo de impressão 3D desenvolvido em 1987, em que o material em pó é sinterizado através de um feixe de laser de CO_2 .

Na Figura 2.6 está representado o esquema da tecnologia SLS. O equipamento consiste num rolo de nivelamento, embolo de armazenamento, cilindro de construção e um laser. O pó é espalhado através de um rolo sobre a superfície de um cilindro onde o modelo será construído. O cilindro desloca-se para baixo, consoante o valor da espessura da camada, de modo a receber uma nova camada de pó. O êmbolo onde o pó se encontra armazenado, com um funcionamento idêntico ao cilindro de construção, move-se para cima de forma incremental para fornecer a quantidade de pó necessária para uma camada nova. O feixe de laser incide sobre a superfície do pó compactado para o fundir seletivamente e ligá-lo formando uma nova camada do modelo. Depois do objeto estar completamente construído, o cilindro de construção sobe para remover o objeto. O excesso de pó é simplesmente retirado, estando a peça pronta para o acabamento manual. Neste processo não são necessários suportes uma vez que o material não sinterizado serve de suporte ao modelo (cama de pó). Uma vantagem associada a esta tecnologia é a variedade de materiais possíveis de utilizar, desde polímeros, metais e cerâmicos em pó. No entanto, a peça necessita de arrefecer antes de poder ser removida da máquina, sendo que peças de grandes dimensões podem necessitar até de dois dias de arrefecimento [6; 20].

A tecnologia SLM (*Selective Laser Melting*) é em todo idêntica à SLS, diferenciando-se apenas no facto da SLM ser apenas aplicada a metais. Na fusão seletiva a laser (SLM), o feixe de laser é utilizado para fundir as partículas de metal, *i.e.* as partículas não são apenas sinterizadas mas sim fundidas de forma homogénea. Por sua vez, o tipo de laser pode variar consoante as partículas metálicas utilizadas, recaindo as escolhas em laser de CO_2 , laser Nd-YAG e laser Yb-YAG [24]. São várias as indústrias que utilizam este tipo de tecnologia, desde a indústria aeroespacial, a aeronáutica e a médica. Além da SpaceX [25] que recorreu à utilização desta tecnologia para produzir peças da câmara de combustão do SpaceX SuperDraco, a NASA também desenvolveu com o recurso à mesma tecnologia, um turbo compressor, conseguindo reduzir o número de componentes presentes neste equipamento [26; 27]. A indústria aeroespacial tem sido a indústria que mais tem adotado estas tecnologias, uma vez que permitem reduzir o peso dos componentes aumentando a eficiência de construção. Na indústria aeronáutica, companhias como a Boeing e a Airbus também começam a utilizar peças obtidas por fabrico aditivo nos seus aviões [28; 29]. Esta tecnologia também tem vindo a ser utilizada nas áreas da saúde principalmente para a produção de implantes [30].

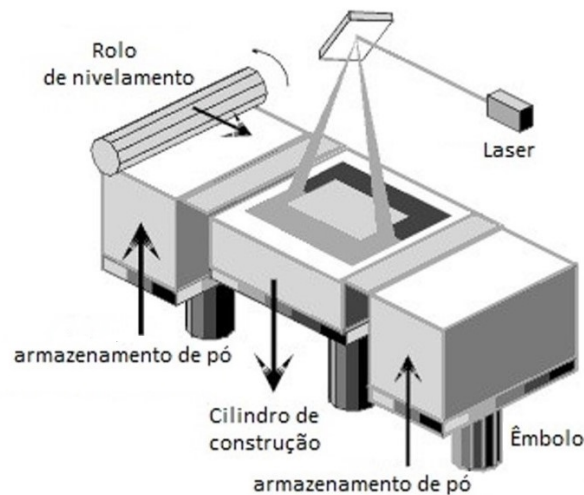


Figura 2.6: Desenho esquemático do processo de Sinterização Seletiva a Laser – SLS. Adaptado de [31].

2.2.3 Impressão 3D

A impressão 3D (3DP da Z Corp.) é um processo desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*MIT*), em 1993 [6].

O processo começa pela deposição de uma camada de material em pó no cilindro de construção, pó esse que se encontra armazenado e é fornecido através do movimento de um êmbolo. De seguida, o rolo de nivelamento distribui e comprime o pó. Posteriormente, um jato de uma solução aquosa é depositado nas zonas a imprimir, unindo o pó e construindo a camada de acordo com o modelo. A partir do momento em que a camada está completa, o cilindro de fabrico move-se para baixo e o processo é repetido até o objeto estar completamente produzido. Tal como o processo SLS anteriormente referido, não é necessário suportes externos durante o fabrico, uma vez que, o pó serve de suporte ao modelo. O funcionamento de ambas as tecnologias de fabrico são bastante idênticas, variando apenas a maneira como o pó é aglomerado [6; 20; 32]. A impressão 3D tem como vantagens o baixo preço dos materiais e o fabrico ser mais rápido do que a maior parte dos restantes processos de fabrico rápido, sendo que, também é possível a impressão a cores. Porém, a baixa resolução, baixa qualidade de acabamento e modelos frágeis são algumas das desvantagens associadas à 3DP. Este processo é denominado por impressão 3D devido à semelhança com o processo de impressão a jato de tinta utilizado nas impressões bidimensionais em papel [6; 20]. Na Figura 2.7 está apresentado um desenho esquemático do processo 3DP.

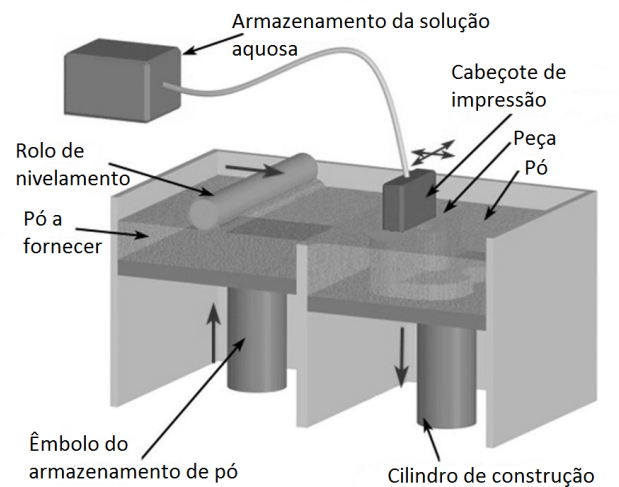


Figura 2.7: Desenho esquemático do processo 3DP. Adaptado de [32].

2.2.4 Robocasting

O *Robocasting* é uma tecnologia de fabrico aditivo para cerâmicos e compósitos, desenvolvida nos *Sandia National Laboratories* [33]. Na Figura 2.8 está esquematizado o processo de *Robocasting*. O processo baseia-se na deposição de camadas, onde o material utilizado se encontra numa espécie de pasta, suspensão ou líquido. Normalmente, o material é constituído por 50-65% de pó de cerâmica, 35-50% de solvente volátil (tipicamente água) e <1% de aditivos orgânicos. Uma das vantagens do *Robocasting* é a mudança quase instantânea do material para o estado sólido depois de depositado, sem a necessidade de reações de polimerização para que ocorra essa transformação. A deposição é feita através de controlo computadorizado, por um orifício que pode chegar à décima de milímetro. Este processo permite produzir, secar e sinterizar peças cerâmicas em menos de 24 horas [33].

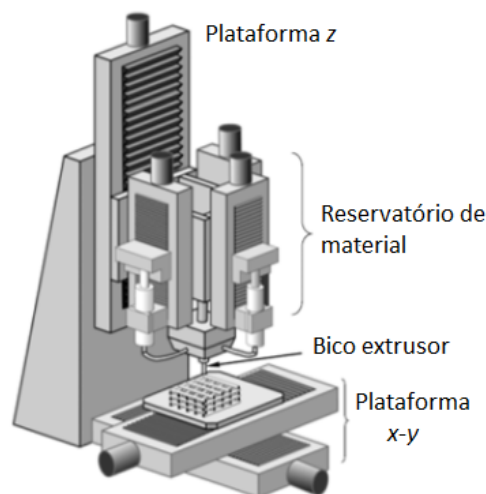


Figura 2.8: Desenho esquemático do processo Robocasting [34].

Capítulo 3

Fabrico por Filamento Fundido

Inventado por Scott Crump em 1988, o processo FDM® (*Fused Deposition Modeling*) é considerado o processo de fabrico aditivo mais conhecido, sendo que no ano de 2006, a *Stratasys Inc* foi responsável pela venda de 54,7% de todos os equipamentos de manufatura aditiva [35]. No entanto, o termo de modelação de material fundido e a sua abreviatura FDM®, são propriedade da *Stratasys Inc* [36]. De forma ao processo poder ser utilizado sem qualquer restrição, membros do projeto RepRap [38] desenvolveram o processo FFF (Fabrico por Filamento Fundido), equivalente ao processo FDM®. O projeto RepRap começou a dar os primeiros passos em 2007, coincidindo este desenvolvimento com a expiração de uma patente sobre a técnica de FDM®, da Stratasys [37; 38; 39].

3.1 Funcionamento

Neste processo de manufatura aditiva, o material encontra-se armazenado em forma de bobines que alimentam um cabeçote extrusor e que se movimenta no plano xOy . Esse cabeçote extrusor, aquece o material até uma temperatura ligeiramente superior à temperatura de fusão deste, por forma a atingir o seu ponto de fusão, permitindo aumentar a adesão entre camadas. O material é extrudido através do bico extrusor e depositado numa plataforma, que poderá ou não ser aquecida para diminuir o gradiente de temperatura, permitindo obter uma menor concentração de tensões na peça final. A plataforma onde o material é depositado, movimenta-se no eixo Oz de forma descendente, movimentando-se à medida que uma camada do modelo é terminada. A distância percorrida toma o valor da espessura dessa camada, para ocorrer a deposição da camada seguinte [20].

Caso sejam necessários suportes, estes são extrudidos e depositados da mesma forma da peça final. O material utilizado na construção dos suportes é o mesmo material do modelo, podendo ser diferente caso haja um segundo bico extrusor. Quando concluída a impressão, o material de suporte é simplesmente retirado manualmente.

Na Figura 3.1 está representado o funcionamento do processo FFF.

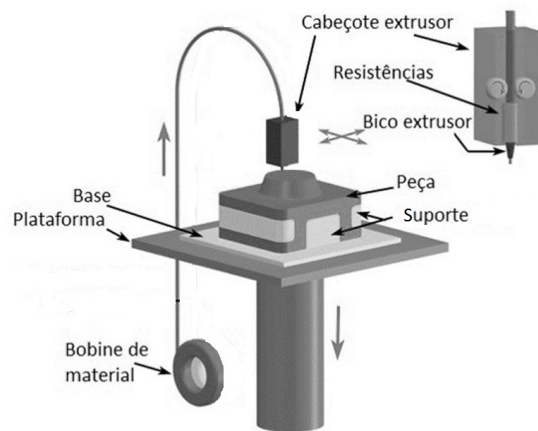


Figura 3.1: Desenho esquemático do processo Fabrico por Filamento Fundido – FFF. Adaptado de [40].

3.2 Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens do processo Fabrico por Filamento Fundido são:

- **Baixo custo:** O processo FFF é dos processos de MA mais baratos, sendo possível, atualmente, adquirir equipamentos, para uso doméstico, a rondar os 500 euros;
- **Permite obter peças com propriedades mecânicas interessantes:** As peças produzidas por esta tecnologia, em polímero termoplástico, conseguem obter cerca de 85% da resistência do material base;
- **Pouco desperdício:** Esta tecnologia é praticamente livre de desperdícios, sendo que o desperdício existente deve-se ao material utilizado para os suportes da peça, caso necessário;
- **Não necessita de tratamentos pós-impressão:** Ao contrário de outros processos, peças obtidas por este processo não necessitam de tratamento de cura. Contudo, se a peça necessitar de um bom acabamento é aconselhado um tratamento superficial para elevar a qualidade final da peça. Caso sejam utilizados suportes também é essencial uma correta remoção dos mesmos [6; 41].

No entanto, o processo FFF apresenta algumas desvantagens:

- **Processo lento:** O fabrico de modelos com elevada complexidade e de grandes dimensões podem demorar dias a serem impressas tendo portanto cadências de produção baixas;
- **Baixa qualidade de acabamento dos equipamentos de utilização doméstica** devido a uma qualidade de impressão inferior, possibilitando a ocorrência do “efeito de escada”, consequência do processo se basear na deposição sucessiva de camadas.

- **Pouca diversidade de materiais disponíveis para impressão:** São ainda pouco os materiais que se pode utilizar nesta técnica. Porém, com o desenvolvimento na área dos materiais, estes têm uma tendência a aumentar consideravelmente nos próximos anos;
- **Pecas com propriedades anisotrópicas:** Como se trata da deposição de material fundido em camada por camada, as propriedades das diferentes camadas variam consoante os parâmetros de cada camada [6; 41].

3.3 Materiais Utilizados

Da pequena lista de materiais existentes para utilização do FFF, existem dois materiais mais utilizados: ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) e PLA (Ácido Polilático).

Numa fase inicial, o ABS era o material mais utilizado, por ser relativamente barato e bastante conhecido industrialmente. Contudo, este polímero apresenta um elevado grau de deformabilidade, sendo uma desvantagem para algumas aplicações. Com o desenvolvimento do processo, começaram a ser equacionadas possíveis alternativas ao ABS. O PLA perfilou-se como uma das alternativas. Uma das vantagens do PLA face ao ABS, é a necessidade do ABS requerer uma plataforma aquecida (cerca de 100 °C) para uma boa impressão, ao contrário do PLA. O PLA, sendo um material mais rígido, apresenta menos deformações do que o ABS. A nível ecológico, o PLA tem a vantagem de provir do amido de milho, ao contrário do ABS (origem petrolífera). Dependendo do equipamento de impressão utilizado, polímeros como o PC (Policarbonato), PA (Poliamida), PVA (Acetato de Polivinilo) e o PEEK (Poli(éter éter cetona)), também podem ser utilizados consoante aplicações mais específicas. Também é possível utilizar polímeros que resultam da combinação dos anteriormente referidos, tais como o ABS-PC [42].

Recentemente com a crescente utilização da nanotecnologia e nanomateriais, uma abordagem seguida, tem sido o reforço de matrizes poliméricas com nanopartículas, tais como nanotubos de carbono e grafeno, melhorando assim as propriedades finais dos materiais [43; 44].

Em relação a máquinas industriais, é possível imprimir com outros materiais tais como o polieterimida (PEI), mais conhecido como ULTEM® 9085, que já começa a ser utilizado na área aeroespacial [45].

A Figura 3.2 apresenta, de forma resumida, alguns dos materiais utilizados na tecnologia FFF. Os materiais mais utilizados encontram-se na camada mais exterior, estando presentes alguns materiais obtidos através da junção de polímeros já utilizados, na camada intermédia. A camada 'nanopartículas' refere-se à possibilidade de incorporar nanopartículas nos materiais utilizados usualmente no processo de FFF. Na Tabela 3.1 encontra-se uma comparação entre o PLA e o ABS.

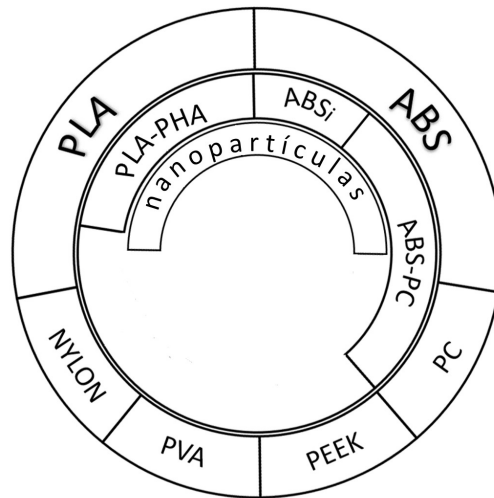


Figura 3.2: Materiais utilizados na tecnologia FFF.

Tabela 3.1: Tabela comparativa entre o PLA e o ABS.

	PLA	ABS
Origem do material	Amido de milho	Petróleo
Propriedades	Resistente	Resistente
	Frágil	Ligeiramente flexível
		Resistente ao calor
Temperatura de Extrusão [°C]	190-220	210-240
<i>Warping</i>	Menor	Maior
Odores aquando da impressão	Não	Sim
Necessidade de mesa aquecida	Não	Sim
Preço (bobine 1kg) [€]	18-21	20-25

3.4 Parâmetros de Impressão

Sendo uma tecnologia que permite fazer tanto protótipos como componentes funcionais, é imperativo que os componentes apresentem as propriedades mecânicas exigidas. Para este fim, não só a escolha do material é relevante, como também é necessário uma correta escolha dos parâmetros de impressão. São vários os parâmetros de impressão que podem influenciar as propriedades finais da peça, podendo serem relacionados com o processo; com o material e com a própria máquina de impressão [46]. A Tabela 3.2 apresenta alguns parâmetros conhecidos, consoante a sua natureza.

Tabela 3.2: Parâmetros relacionados com o processo, material e máquina de impressão.

Parâmetros relacionados com		
Processo	Material	Equipamento
Temperatura de extrusão	Propriedades intrínsecas	Diâmetro do bico extrusor
Velocidade de impressão	Viscosidade	Taxa de alimentação
Contorno da peça	Cor	Velocidade de impressão
Espessura da camada		
Ângulo de preenchimento		
Largura da camada		
Preenchimento		
Orientação		

São considerados parâmetros relacionados com o processo de impressão todos aqueles existentes durante a operação, independentes do material e da máquina utilizada. Além de fatores como a temperatura a que o material é extrudido (temperatura de extrusão), e a velocidade de deposição, os parâmetros relacionados com o processo de impressão são: o perímetro da peça final; a espessura e largura da camada depositada; o ângulo de preenchimento e os espaços vazios. Estes parâmetros estão representados na Figura 3.3 [46].

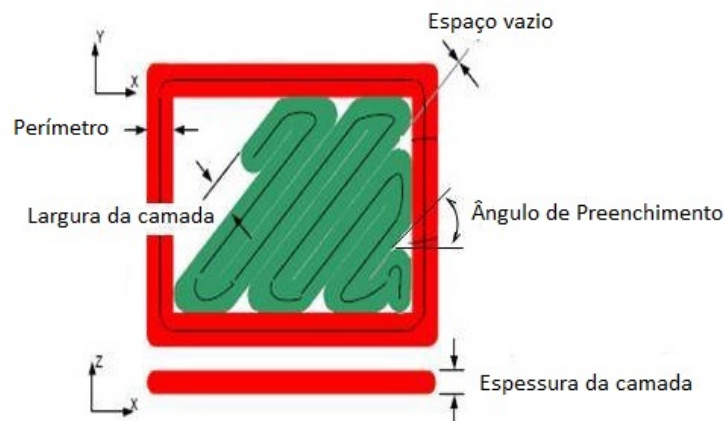


Figura 3.3: Parâmetros relacionados com o processo de FFF. Adaptado de [47].

O ângulo de preenchimento é o ângulo criado pelo filamento depositado e a direção positiva do eixo Ox da plataforma de construção, enquanto que a largura e espessura da camada se referem à largura do filamento depositado e à altura do mesmo. Os espaços vazios são os espaços de ar existentes entre os filamentos de material depositados. O valor padrão é zero, o que significa que os filamentos apenas se tocam. Este valor pode ser positivo, caso se queira que os filamentos não se toquem e o espaço vazio seja maior, ou negativo, caso se pretenda um componente mais resistente e com uma estrutura mais densa (dois filamentos ocupam parcialmente o mesmo espaço). Para peças utilizadas como protótipos apenas para ajuda visual, é aconselhável utilizar um valor positivo de modo a poupar material e tornar a impressão mais rápida [48].

Consoante o software a utilizar, o parâmetro referente aos espaços vazios pode ser encontrado como sendo a percentagem de preenchimento. No entanto, uma peça impressa com 100% de preenchimento não significa que seja completamente densa (espaços vazios com valor 0 ou valor negativo), variando este valor consoante a máquina de impressão utilizada [49]. A Figura 3.4 ilustra os três valores possíveis, sendo o esquema “+ *air gap*” relativo a valores positivos, “0 *air gap*” quando os filamentos depositados apenas se tocam, e “- *air gap*” quando filamentos ocupam o mesmo espaço de forma parcial.

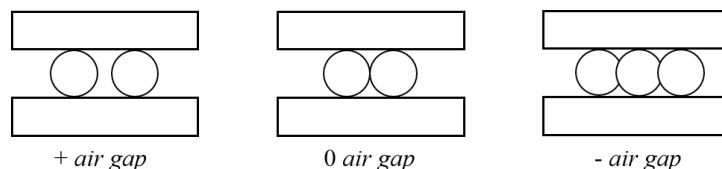


Figura 3.4: Possíveis valores de espaços vazios (*air gap*) entre dois filamentos adjacentes depositados [50].

A orientação de impressão refere-se à orientação segundo a qual a peça é impressa. Essa orientação depende do referencial que se esteja a utilizar, que pode ser tanto referente aos eixos do sistema de coordenadas cartesianas $Oxyz$, como ao referencial xOy , entre outros. Na Figura 3.5 pretende-se mostrar as diferentes orientações em dois referenciais.

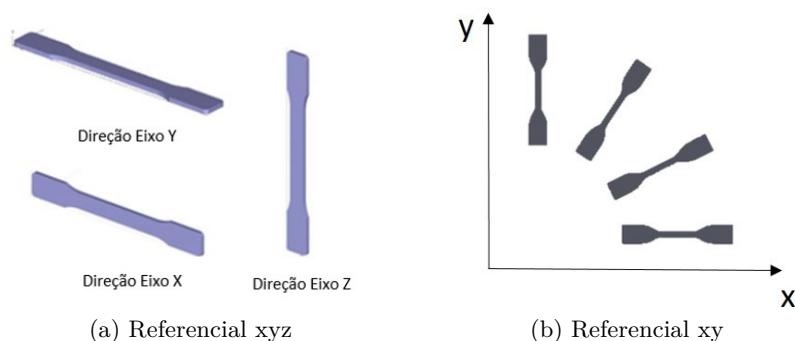


Figura 3.5: Exemplo de diferentes referenciais possíveis de utilizar [51].

A temperatura de envelope, referente à temperatura controlada que envolve a peça a ser impressa, também é um parâmetro de impressão existente, caso a impressão seja realizada numa câmara com ambiente controlado [46].

Os parâmetros relacionados com o material estão diretamente relacionados com as propriedades intrínsecas da matéria-prima a ser utilizado na impressão visto que, se a impressão for a correta, as propriedades da peça serão tão melhores quanto as do material. Outro fator relacionado com as propriedades do material é a sua viscosidade. Esta irá influenciar o fluxo de material a depositar assim como a adesão entre as diferentes camadas [46]. A cor do polímero utilizado também pode ser considerada como uma característica relacionada com o material.

Segundo Agarwala *et al.* [46], o diâmetro do bico extrusor, a velocidade das rodas de guiamento existentes no cabeçote extrusor e a taxa de alimentação do bico extrusor, são alguns dos parâmetros relacionados com o equipamento que podem influenciar o processo FFF. A forma e o tamanho do filamento depositado depende do diâmetro do bico extrusor, que também influencia a facilidade do material fluir. A precisão da peça também dependerá deste diâmetro pois para uma maior precisão, menor terá de ser o diâmetro do bico. Quanto melhor o auxílio das rodas de guiamento maior será a facilidade em guiar o filamento até ao cabeçote extrusor, aumentando assim a taxa de alimentação.

Influência dos Vários Parâmetros

Tendo em conta os parâmetros mencionados, vários investigadores têm realizado estudos de modo a aferir a influência dos diferentes fatores nas propriedades mecânicas finais das peças obtidas por FFF.

Tymrak *et al.* [49] avaliaram a influência da espessura das camadas e do ângulo de preenchimento em provetes de ABS e PLA, mantendo a percentagem de preenchimento nos 100%. Apesar de ter sido utilizado o mesmo ficheiro .STL, utilizaram-se diversas impressoras *open source*, incluindo uma Mendel RepRap [52], uma Prusa Mendel RepRap [53], uma Lulzbot Prusa RepRap [54] e uma MOST RepRap [55]. Os software utilizados também variaram entre o Skeinforge, o Slic3r e o Cura. Os restantes parâmetros, tais como a temperatura de extrusão, diferiram entre impressoras, sendo utilizado as melhores configurações de cada. As propriedades mecânicas avaliadas foram a resistência à tração, a deformação de rutura e o módulo de elasticidade, sendo que a melhor resistência à tração, para as peças produzidas em ABS, foi conseguida com camadas de menores espessuras e com ângulos de preenchimento de $-45^{\circ}/45^{\circ}$, enquanto que, com camadas de maiores espessuras e com ângulos de preenchimento de $0^{\circ}/90^{\circ}$, conseguiram um melhor módulo de elasticidade. Avaliando a influência dos parâmetros para o PLA, as peças com espessura de camada de 0,2 mm foram as que obtiveram melhor resistência à tração, no entanto para um ângulo de preenchimento de $0^{\circ}/90^{\circ}$.

No estudo realizado por Carneiro *et al.* [56], foi utilizado uma Prusa i3 com um bico extrusor de 0,4 mm de diâmetro para analisar a importância da espessura da camada, ângulo de preenchimento e percentagem de preenchimento nas propriedades mecânicas finais. Foi utilizado polipropileno (PP) e polipropileno reforçado com fibra de vidro, impressos a uma temperatura de 165°C e 185°C , respetivamente. Os autores concluíram que um ângulo de preenchimento de 0° permitia obter melhores resultados de resistência à tração visto que os filamentos se encontravam na direção axial, sendo tracionados “diretamente”. Em relação à espessura da camada, os melhores resultados para a resistência à tração foram obtidos com uma espessura da camada de 0,35 mm. Tendo em conta a variação da percentagem de preenchimento, apuraram que as melhores propriedades eram alcançadas com 100% de preenchimento. Em relação ao material utilizado, o uso de polipropileno reforçado com fibra de vidro permitiu um aumento em 30% do valor do módulo de elasticidade e 40% do valor da resistência à tração, em comparação com o polipropileno.

Por sua vez, no estudo realizado por Onwubolu *et al.* [50] os parâmetros estudados foram o ângulo de preenchimento; a orientação; a espessura e largura das camadas depositadas; e os espaços vazios entre as deposições. O modelo 3D do provete foi modelado a partir do software SolidWorks, sendo depois o ficheiro .STL importado para o software FDM Insight. Em relação à impressão dos provetes, o equipamento utilizado foi a Stratasys FDM Fortus 400mc System. Os autores concluíram que com camadas de baixas espessuras e larguras de deposição, com uma orientação axial e com espaços vazios negativos, alcançavam provetes com uma melhor resistência à tração. Ahn *et al.* [48] obtiveram as mesmas conclusões com as experiências realizadas.

Wu *et al.* [57] estudaram a influência do ângulo de preenchimento e da espessura das camadas em provetes de PEEK e ABS. Realizaram testes de tração, compressão e flexão, sendo impresso diferentes tipos de provete consoante o teste mecânico. Todos os provetes foram modelados através do software CATIA V5 e impressas cinco amostras para cada geometria. Todos os provetes foram impressos com 0 mm de espaços vazios entre deposições e dois perímetros, sendo que o bico extrusor utilizado possuía um diâmetro de 0,4 mm. Provetes com espessura depositada de 0,3 mm permitiram obter os melhores resultados para todos os ensaios mecânicos realizados, sendo que com uma espessura depositada de 0,4 mm os valores decresceram significativamente. Em relação aos ângulos de preenchimento estudados, os melhores resultados foram obtidos para ângulos de preenchimento de 0°/90°. Tanto as amostras de PEEK como as de ABS apresentaram piores propriedades mecânicas quando comparadas com os mesmos materiais obtidos por injeção, consequência dos vários espaços vazios no interior das peças impressas. O interior dos provetes impressos foram analisados por microscopia eletrónica de varrimento (SEM), mostrando que nas amostras de ABS as camadas depositadas são distinguíveis ao contrário do que é observado para as amostras de PEEK.

Ângulo de preenchimento e espaço vazio entre deposições foram os parâmetros estudados por Dawoud *et al.* [58]. Utilizaram diferentes combinações de ângulos de preenchimento e variaram o espaçamento entre deposições numa gama de -0,05 mm a 0,05 mm. Os valores de espessura de deposição, o perímetro das amostras e a temperatura de extrusão foram fixados em 0,5 mm, 1 e 250°C, respetivamente. O material utilizado foi o ABS, necessitando assim de uma base de impressão aquecida (120°C). Obtiveram-se provetes por injeção e por fabrico aditivo para uma comparação das propriedades mecânicas, sendo realizados testes de tração, flexão e de impacto. Na obtenção das amostras por fabrico aditivo, foi utilizado a máquina DIY FDM com um bico extrusor de 1 mm de diâmetro. SolidWorks e Slic3r foram os software utilizados. Observou-se que os provetes produzidos com espaços vazios negativos, atingiam 98% da densidade dos provetes processados por injeção, sendo que, com um espaçamento entre deposições de -0,05 mm e ângulos de preenchimento de -45°/45°, foi possível obter 91% da resistência à tração e 86% da resistência à flexão em relação às resistências das peças obtidas por injeção.

Bagsik *et al.* [51] utilizaram o polieterimida (PEI) como material, variando os valores de espessura da camada, ângulo de preenchimento e de espaço vazio entre deposições de material. Os provetes, com geometrias normalizadas pela ASTM D638, foram impressos nas orientações X (lateral), Y (plano) e Z (em pé). Através dos testes de tração realizados, os autores concluíram que com espessuras maiores a resistência à tração é superior

na direção X e Z, enquanto que em Y a resistência à tração é maior para espessuras menores. Analisando a influência dos espaços entre deposições, verificaram que, com espaços negativos, conseguiam obter os melhores resultados independentemente da orientação utilizada na impressão do provete. Em relação à orientação, perceberam que as peças impressas na orientação X conseguiam melhores resistências à tração enquanto que as peças com piores valores de resistência à tração eram impressos segundo a orientação Z.

Outro estudo feito neste campo de investigação, foi realizado por Nidagundi *et al.* [59] que estudou a influência de parâmetros como, a orientação, o ângulo de preenchimento e a espessura da camada, na resistência e rugosidade da peça impressa, na precisão dimensional e no tempo de impressão. A impressora utilizada foi a Julia 3D, utilizando um bico extrusor com um diâmetro de 0,4 mm e ABS como material. Para os testes mecânicos de tração foram impressos provetes adequados para a situação, enquanto que para a avaliação à precisão dimensional foi impresso um cubo de $1 \times 1 \times 1$ mm. Os melhores valores tanto de resistência à tração, de precisão, como de rugosidade foram obtidos para espessuras de deposição de 0,1 mm e uma orientação e ângulo de preenchimento de 0° . Com a análise feita às relações sinal-ruído, perceberam que a resistência à tração diminui com o aumento da espessura da camada e com o aumento do ângulo de preenchimento e de orientação. A precisão dimensional e a rugosidade são afetadas da mesma forma que a resistência à tração. Em relação ao tempo de impressão, espessuras de camada de 0,3 mm e ângulos de preenchimento e de orientação de 0° foram os valores que permitiram tempos de fabrico mais baixos. Dos três parâmetros estudados, a espessura do material depositado foi a que apresentou uma maior influência nos estudos realizados.

Wittbrodt *et al.* [60] utilizaram a impressora Lulzbot TAZ 4 para estudar a influência da cor do material utilizado para diferentes temperaturas de extrusão. O material utilizado foi PLA de diversas cores (PLA natural, preto, cinzento, azul e branco) enquanto que a temperatura de extrusão foi fixada numa primeira fase em 190°C e depois alterada para 200°C , 210°C e 215°C . Todas as amostras foram impressas com 100% de preenchimento e a base de impressão foi aquecida a uma temperatura de 60°C . Para uma avaliação aos provetes impressos, fizeram testes de tração para estudar a resistência e utilizaram difração de raios-X para avaliar a cristalinidade dos materiais usados. Analisando os valores de cristalinidade dos diferentes materiais utilizados, verificaram que o PLA natural apresentava uma percentagem de cristalinidade inferior a todas as outras cores ($0,93\% \pm 0,06$), sendo o PLA branco o que detinha o maior valor de cristalinidade ($5,05\% \pm 0,18$). Em relação à resistência à tração, para uma temperatura de extrusão de 190°C , o PLA natural foi o que permitiu obter um valor superior. Numa segunda fase onde foi variada a temperatura de extrusão, apenas foi utilizado PLA branco por apresentar maior cristalinidade. Enquanto que, com o aumento da temperatura, os valores de resistência à tração aumentaram, a percentagem de cristalinidade aumentou até aos 210°C tendo diminuído para 215°C . Os autores concluíram desta forma que, a resistência à tração era inversamente proporcional à percentagem de cristalinidade, e que a variação desta última se poderia dever aos diferentes corantes utilizados para colorir o PLA.

O ângulo de preenchimento foi o parâmetro estudado por Ziemian *et al.* [61].

Imprimiram-se diferentes geometrias de provetes consoante os testes a realizar (tração, compressão, flexão, impacto e fadiga). A máquina utilizada para impressão foi a Stratasys Vantage-ti. Enquanto que os ângulos de preenchimento estudados variaram entre 0° , 45° , 90° e $-45^\circ/45^\circ$, a espessura e largura da camada depositada foram de 0,1778 mm e 0,3048 mm, respetivamente. Os provetes obtidos por fabrico aditivo foram produzidos num ambiente controlado a 80°C , sendo que também foram obtidos provetes por injeção. Nos testes de tração, flexão e impacto, os provetes com ângulos de preenchimento de 0° obtiveram melhores resultados enquanto que, os piores resultados foram obtidos para um ângulo de preenchimento de 90° . Através dos testes de compressão, os autores verificaram que, com um ângulo de preenchimento de 90° , a resistência à compressão era de 83% quando comparado com os valores dos provetes injetados. Por fim, com os testes de fadiga mostraram que o ângulo de preenchimento de 45° foi o que necessitou de um menor número de ciclos até à ocorrência da falha, representando apenas 26,7% dos ciclos atingidos para ângulos de preenchimento de $-45^\circ/45^\circ$.

Lee *et al.* [62] compararam as propriedades das peças obtidas por fabrico por filamento fundido, por impressão 3D e por *nano composite deposition system*, variando apenas a orientação da peça entre axial e transversal. A partir dos testes de compressão realizados, os autores concluíram que os melhores resultados foram obtidos através da tecnologia FFF, sendo os provetes obtidos por impressão 3D os que registaram os piores resultados. No processo FFF, amostras produzidas com uma orientação axial obtiveram uma resistência à compressão de 11,6% superior à dos provetes com orientação transversal.

Velocidade de impressão e espessura da camada foram os parâmetros estudados por Christiyani *et al.* [63]. Realizaram-se testes de tração e flexão para perceber a influência dos parâmetros em causa nas propriedades mecânicas das peças impressas. A máquina de impressão utilizada foi uma 3D protomaker STURDY, com um bico extrusor de 0,6 mm que foi mantido a 190°C . Como o material utilizado foi o ABS, a plataforma de construção foi aquecida a 70°C , para imprimir corretamente os provetes normalizados a partir das normas ASTM D638 (tração) e ASTM D790 (flexão). As conclusões retiradas mostram que tanto a resistência à tração como a resistência à flexão aumentam com a diminuição da espessura da camada e velocidade de impressão. Uma menor velocidade de impressão e menor espessura da camada permitem uma melhor adesão entre camadas, obtendo dessa forma resistências superiores.

Outro estudo feito neste contexto, foi realizado por Sood *et al.* [64] que variaram os ângulo de preenchimento, a orientação, a espessura e largura das camadas depositadas, e os espaços vazios existentes entre elas. Testes de tração, flexão e de impacto foram os ensaios mecânicos realizados aos provetes impressos em ABS. As conclusões do estudo realizado focam-se em mostrar os prós e os contras da variação dos parâmetros estudados, concluindo que um aspeto fundamental para obter peças com uma boa resistência passa pela redução da distorção existente e de uma boa ligação entre camadas. Os melhores valores de resistência à tração e flexão foram obtidos com 0,1270 mm de espessura, uma orientação de 30° , um ângulo de preenchimento de 60° , uma largura de 0,4064 mm e 0,0080 mm de espaço entre camadas depositadas, enquanto que para o impacto os valores diferiram para a espessura e largura da camada (0,2540 mm e 0,5064,

respetivamente).

Os parâmetros estudados e as observações retiradas dos vários estudos referidos, encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Resumo de observações gerais retiradas de estudos realizados por diferentes autores.

	Observações Gerais	Referências
Espessura da Camada	Menores valores de espessura da camada obtêm melhores valores de resistência à tração.	[49; 50; 51; 59; 63]
	Maiores valores de espessura da camada alcançam maiores valores de resistência à tração (podendo depender da orientação).	[51; 56; 57]
Ângulo de Preenchimento	Ângulos de preenchimento de 0° (ou $0^\circ/90^\circ$) permitem obter maiores valores de resistência à tração.	[49; 50; 56; 57; 59; 61]
	Os melhores valores de resistência à tração são obtidos com ângulos de preenchimento de $-45^\circ/45^\circ$.	[49; 58]
Largura da Camada	Menores valores de largura da camada obtêm melhores valores de resistência à tração.	[50]
Preenchimento	As melhores propriedades mecânicas são obtidas com 100% de preenchimento (ou espaços vazios negativos).	[50; 51; 56; 58]
Orientação	Provetes com uma orientação axial (eixo X) obtêm uma maior resistência.	[50; 51; 59; 62]
Temperatura de Extrusão	Maior temperatura de extrusão (215°C) permite obter melhores valores de resistência à tração.	[60]
Velocidade de Impressão	Menores velocidades de deposição obtêm melhores valores de resistência à tração.	[63]
Cor	A cor do material tem influência nas propriedades uma vez que a cristalinidade varia consoante a cor do material utilizado.	[60]

Capítulo 4

Modelos de Previsão

O estudo de modelos de previsão das propriedades das peças impressas é extremamente importante uma vez que permite fazer uma avaliação prévia à capacidade da peça resistir a esforços sofridos durante a sua utilização. Com o aumento da utilização de tecnologias de fabrico aditivo para a produção de modelos funcionais, torna-se cada vez mais necessário conhecer as propriedades que a peça irá apresentar para que não ocorra nenhuma falha em resposta a esforços mecânicos.

No presente capítulo pretende-se fazer um estudo de modelos que auxiliam na previsão das propriedades finais das peças obtidas por FFF. São abordados modelos analíticos como a Lei das Misturas e alguns modelos de previsão para materiais celulares. Outra abordagem passa pela utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA).

4.1 Modelos Analíticos

A pesquisa bibliográfica realizada não conseguiu encontrar métodos de previsão que se adequassem a aferir as propriedades mecânicas das peças obtidas por FFF. Assim, optou-se por utilizar modelos analíticos simples com o intuito de aferir a sua adequação, tais como a lei das misturas e modelos analíticos utilizados em materiais porosos, como as espumas.

4.1.1 Lei das Misturas

Utilizando o método da Lei das Misturas, utilizado normalmente para materiais compósitos, é possível determinar o módulo de elasticidade do compósito consoante o módulo de elasticidade e fração volúmica de cada composto, *i.e.* do reforço e da matriz. A Lei das Misturas assume que cada constituinte do material compósito contribui para as propriedades mecânicas finais, sendo essa contribuição dependente da fração volúmica de cada constituinte. Esta relação é constituída por um limite superior (modelo de Voigt) e um limite inferior (modelo de Reuss). Para calcular o limite superior, considera-se que a força é aplicada na direção longitudinal (em paralelo) ao alinhamento das fibras uma vez que é o caso em que as propriedades obtidas são máximas.

Em relação ao modelo de Reuss, os valores conseguidos referem-se aos mínimos uma vez que este limite é calculado considerando que a força é aplicada na direção transversal ao alinhamento das fibras (em série). Na Figura 4.1 estão representados os dois modelos referidos.

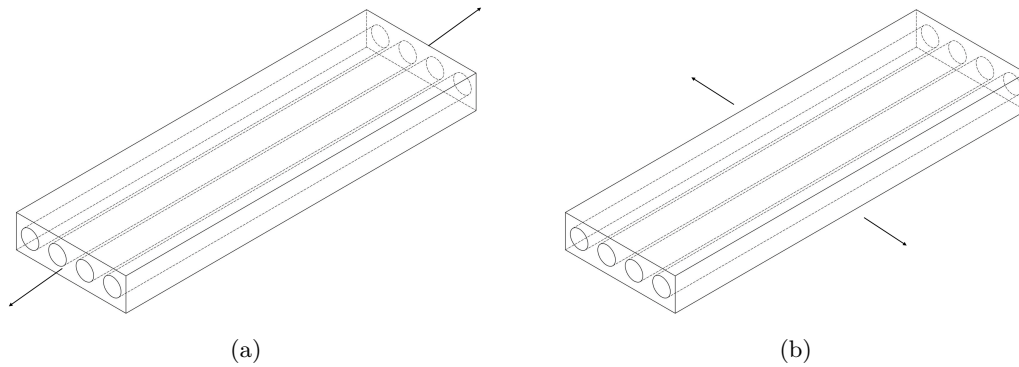


Figura 4.1: Representação da Lei das Misturas: (a) modelo de Voigt (paralelo), (b) modelo de Reuss (série).

Os limites superior e inferior podem ser determinados através das Equações 4.1 e 4.2, respetivamente [65].

$$E_c = E_f \times f_v + E_m \times (1 - f_v) \quad (4.1)$$

$$E_c = \frac{E_m \times E_f}{E_m \times f_v + E_f \times (1 - f_v)} \quad (4.2)$$

- E é o módulo de Young, em GPa;
- f_v é a fração volúmica do reforço;
- $1 - f_v$ é a fração volúmica da matriz;
- c, f e m são os índices correspondentes a compósito, fibra e matriz, respetivamente.

Este método foi utilizado na previsão das propriedades mecânicas das peças impressas por FFF, uma vez que é um método simples, para prever as propriedades mecânicas de materiais compósitos. Assim, devido à semelhança entre os provetes impressos e os materiais compósitos, assumiu-se que o provete produzido é um material compósito composto por ar (espaços vazios existentes dentro do provete) e pelo material envolvente, neste caso PLA.

4.1.2 Modelos de Previsão para Materiais Celulares

Os materiais celulares são um tipo de material que têm vindo a ganhar espaço em diversas aplicações de engenharia, nomeadamente na indústria dos transportes. Consoante a morfologia das espumas, estas podem ter uma estrutura porosa de células abertas ou células fechadas. Os poros podem estar ligados entre si apenas por arestas ou pelas paredes, denominando-se espuma aberta e espuma fechada, respetivamente. Para uma melhor compreensão, ambas as estruturas porosas estão representadas na Figura 4.2. Alguns modelos de previsão para materiais porosos foram estudados, uma vez que os provetes impressos se assemelham a espumas com ambas as estruturas: desprezando as camadas envolventes, o provete assume uma estrutura aberta visto que os poros estão ligados entre si apenas por arestas; se se tiver em conta o provete na sua totalidade, os modelos utilizados para espumas de estrutura porosa fechada são mais apropriados.

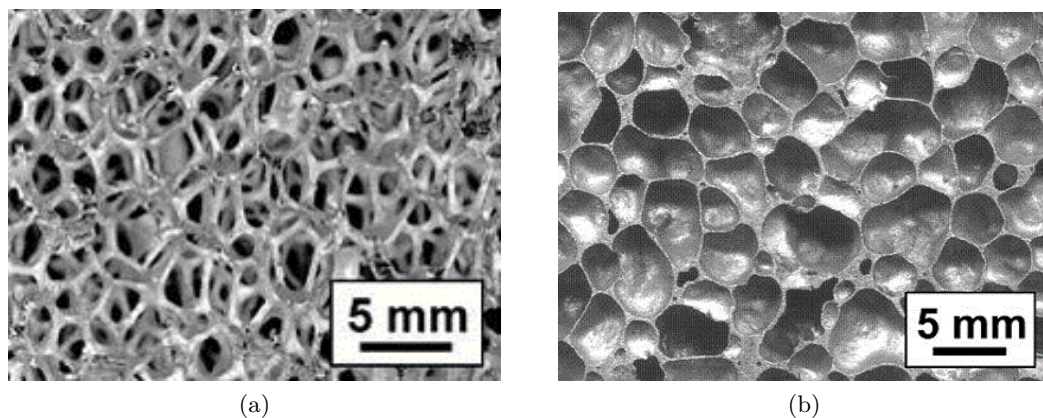


Figura 4.2: Espumas: (a) estrutura de células abertas, (b) estrutura de células fechadas [66].

Com o aumento da utilização destes materiais, é imperativo conhecer o seu comportamento mecânico por forma a garantir o seu correto funcionamento. Existindo na literatura vários modelos de previsão das propriedades para estes materiais, optou-se por três modelos, que serão utilizados futuramente no âmbito deste trabalho.

- Modelo criado por Gibson e Ashby, por ser um modelo generalista;
- Modelo criado por Simone e Gibson, por ser utilizado em estruturas com espessuras uniformes;
- Modelo criado por Rens e Ehrenstein, por assumir que o material se encontra nas paredes das células.

Modelo criado por Gibson e Ashby

Este modelo é utilizado na previsão das propriedades de espumas abertas, sendo considerado o modelo mais generalista [67]. O módulo de elasticidade pode ser obtido através da Equação 4.3.

$$\frac{E}{E_s} = \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 \quad (4.3)$$

- E é o módulo de Young, em GPa;
- ρ é massa volúmica, em g/cm³;
- s é o índice correspondentes ao sólido.

Modelo criado por Simone e Gibson

O modelo criado por Simone e Gibson em 1998, é um dos modelos analíticos existentes para prever as propriedades mecânicas de espumas fechadas com espessuras uniformes [68]. Uma vez que, os provetes produzidos por FFF utilizam espessuras da camada semelhantes em toda a peça, decidiu-se que seria um modelo adequado no presente estudo. A Equação 4.4 permite determinar o módulo de Young.

$$\frac{E}{E_s} = 0,3163 \times \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 + 0,3188 \times \frac{\rho}{\rho_s} \quad (4.4)$$

- E é o módulo de Young, em GPa;
- ρ é a massa volúmica, em g/cm³;
- s é o índice correspondentes ao sólido.

Modelo criado por Rens e Ehrenstein

O modelo de Rens e Ehrenstein foi criado em 1982 e assume que todo o material se encontra nas paredes das células [67]. Enquadrando os filamentos depositados como sendo as paredes divisórias das diferentes células, o modelo em causa poderá ser adequado à previsão das propriedades mecânicas das peças produzidas por FFF. O módulo de elasticidade pode ser determinado através da Equação 4.5.

$$\frac{E}{E_s} = 0,33 \times \frac{\rho}{\rho_s} \quad (4.5)$$

- E é o módulo de Young, em GPa;
- ρ é a massa volúmica, em g/cm³;
- s é o índice correspondentes ao sólido.

4.2 Redes Neuronais Artificiais

Não sendo os modelos analíticos estudados, à partida, adequados para o estudo pretendido, outro método de previsão utilizado foi o das redes neuronais artificiais. As Redes Neuronais Artificiais, RNA (em inglês *Artificial Neural Networks*, *ANN*), são uma ferramenta computacional que apresenta um modelo matemático inspirado na estrutura neuronal do cérebro humano. Esta ferramenta computacional é ideal para resolver uma grande variedade de tarefas em diversas áreas, tais como realizar diagnósticos médicos (área médica), controlar a qualidade de determinado material consoante o equipamento (área industrial), ou detetar movimentos fraudulentos (área financeira) [69]. A utilização de RNA é feita com o objetivo de prever, modelar ou identificar algo onde não seja possível utilizar nenhum modelo teórico existente. Onwubolu *et al.* [50] utilizaram um tipo de redes neuronais para prever a resistência à tração de provetes produzidos por FDM®, enquanto Sood *et al.* [70] previram as propriedades mecânicas de provetes, também impressos por FDM®, mas para ensaios de compressão. Ambos os estudos provaram a eficiência do uso de redes neuronais para previsão das propriedades mecânicas das peças produzidas por fabrico aditivo, sendo que o erro obtido por Sood *et al.* [70] foi de apenas 0,192. Consoante o fim funcional que se pretende, existem diferentes modelos de redes neuronais [71]. Na Figura 4.3 está ilustrado um exemplo simplificado de uma rede neuronal artificial.

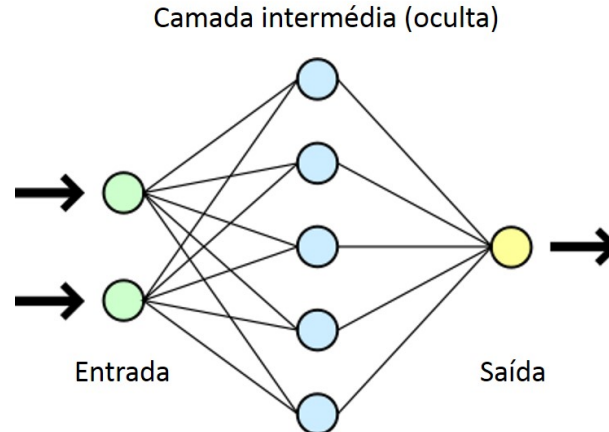


Figura 4.3: Exemplo de uma Rede Neuronal Artificial. Adaptado de [71].

Funcionamento

A primeira camada, que recebe os *inputs*, é conhecida como a camada de entrada. Os *inputs* recebidos podem ter várias formas de informação, sejam parâmetros, algoritmos ou padrões, que a rede irá tentar aprender, reconhecer ou processar. Por sua vez, a camada que interage com os *outputs* apresenta os dados finais após o processamento, e é denominada como camada de saída. As camadas intermédias são designadas como camadas ocultas e interligam as camadas de entrada e de saída. O número de camadas ocultas varia consoante a complexidade da rede neuronal, sendo este número diretamente proporcional à complexidade da rede [71].

No funcionamento, cada *input* é multiplicado por um peso estabelecido antes de ser enviado para a camada seguinte, de modo sucessivo até à camada de saída. Numa fase inicial, é necessário treinar a rede. Na etapa de treino da rede, os pesos são modificados de modo a atingir um *output* próximo do pretendido, sendo que, quanto maior o peso, maior a influência de uma camada na outra. A fase de treino termina quando se considera que o erro obtido é mínimo e próximo do desejado. Estando treinada, a rede começa a produzir resultados de forma independente. Existem diferentes treinos, consoante as regras e algoritmos de aprendizagem utilizados [71], [72].

A fase de treino pode ser:

- Supervisionada: Tanto os *inputs* como os *outputs* associados são ensinados previamente à rede;
- Não supervisionada: A rede tem de descobrir sozinha relações ou padrões nos dados que lhe vão sendo apresentados e codificá-las nas saídas;
- Híbrida: São ensinados alguns *inputs* e *outputs* mas também é necessário a rede codificar alguns valor não ensinados [72].

As redes neurais podem ser estáticas, ou dinâmicas caso continuem a aprender durante o seu funcionamento independente. No presente estudo, a rede neuronal artificial criada é híbrida, uma vez que são ensinados os parâmetros estudados (*inputs*) e as propriedades mecânicas pretendidas (*outputs*), e tem a capacidade de prever as propriedades mecânicas de valores de *inputs* não ensinados. Como a rede criada não aprende de forma independente durante o funcionamento, é correto afirmar que é uma rede neural estática.

Parte II

Parte Experimental

Capítulo 5

Componente Experimental

No presente capítulo, serão abordados os aspetos relacionados com o procedimento experimental. Os parâmetros de impressão estudados, o polímero e a impressora utilizados são alguns dos assuntos expostos nesta secção. A norma que os provetes respeitam e os testes realizados são também temas abordados.

5.1 Parâmetros Estudados

Devido ao elevado número de parâmetros existentes com influência nas propriedades finais dos componentes produzidos por FFF, foi necessário eleger aqueles que mais se adequavam ao estudo pretendido. Estes foram escolhidos consoante os parâmetros utilizados em artigos semelhantes [49; 50; 56]. Depois de uma análise detalhada, decidiu-se que os parâmetros mais interessantes para avaliar seriam (Fig. 5.1):

- Orientação de impressão dos provetes;
- Espessura da camada;
- Ângulo de preenchimento;
- Largura da camada;
- Percentagem de preenchimento.

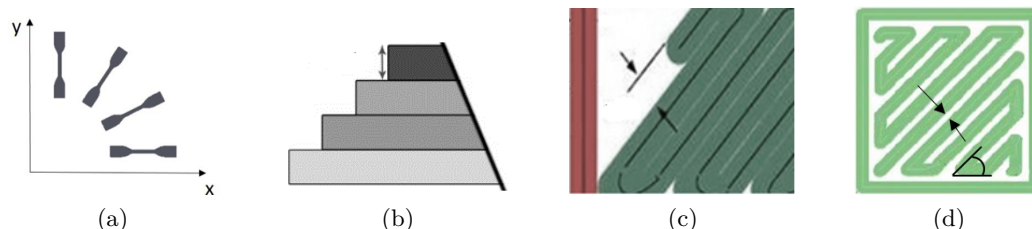


Figura 5.1: Parâmetros estudados: (a) Orientação, (b) Espessura da camada, (c) Largura da camada, (d) Ângulo de preenchimento e Espaços vazios.

DOE - *Design of Experiments*

Depois de escolhidos os parâmetros é imperativo planejar os ensaios ao detalhe, daí a importância do *Design Of Experiments* (DOE). O DOE, Planejamento de Ensaios, é uma técnica utilizada para planejar os ensaios, ou seja, para definir quais os dados, em que quantidade e em que condições devem ser recolhidos durante um determinado ensaio.

Uma técnica utilizada de DOE é o método de Taguchi [73]. Este método utiliza matrizes ortogonais e permite planejar os ensaios baseado em diretrizes bem definidas. Por sua vez, estas matrizes determinam a maneira de conseguir o número mínimo de ensaios que podem dar a informação completa de todos os parâmetros que afetam o desempenho. O ponto crucial deste método reside em escolher os níveis dos diversos fatores de entrada para cada ensaio. Embora existam várias matrizes ortogonais padrão disponíveis, cada uma é destinada a um número específico de parâmetros independentes e dos seus respectivos níveis.

No caso do presente trabalho, como foram identificados quatro parâmetros independentes (sem inclusão da orientação), cada um com três níveis, a matriz ortogonal L9 é a escolha que mais se adequa [73]. Na Tabela 5.1 mostram-se os diversos parâmetros estudados e os referentes níveis, enquanto que na Tabela 5.2 apresenta-se a matriz ortogonal utilizada com as diferentes combinações de fatores.

Tabela 5.1: Parâmetros estudados e respectivos níveis.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Espessura da Camada [mm], A	0,10	0,20	0,30
Ângulo de Preenchimento [°], B	0	-45/45	0/90
Largura da Camada [mm], C	0,40	0,48	0,56
Preenchimento [%], D	20	60	100

Tabela 5.2: Matriz ortogonal L9 do método de Taguchi preliminar.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]
C1	0,10	0	0,40	20
C2	0,10	-45/45	0,48	60
C3	0,10	0/90	0,56	100
C4	0,20	0	0,48	100
C5	0,20	-45/45	0,56	20
C6	0,20	0/90	0,40	60
C7	0,30	0	0,56	60
C8	0,30	-45/45	0,40	100
C9	0,30	0/90	0,48	20

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento

C: Largura da Camada; D: Preenchimento

Em relação à orientação, esta não se encontra associada ao método de Taguchi criado, uma vez que se decidiu numa primeira fase imprimir provetes variando apenas este parâmetro, com os restantes valores pré-definidos, para avaliar qual a influência da máquina nas propriedades finais. Como o cabeçote extrusor das impressoras domésticas utiliza um motor passo-a-passo, os filamentos depositados diagonalmente não são propriamente diagonais mas sim um conjunto de incrementos em x e y, o que poderá influenciar as propriedades mecânicas finais das peças. O referencial escolhido na variação da orientação dos provetes foi o referencial com as orientações indicadas na Figura 5.2.

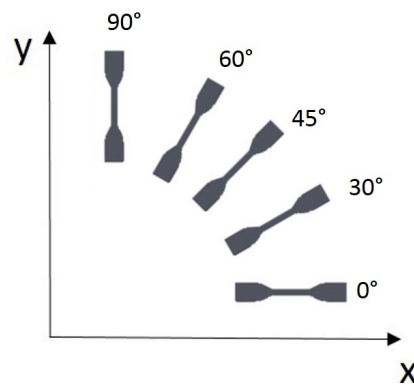


Figura 5.2: Referencial e orientações utilizadas.

5.2 Material Utilizado

O material utilizado na impressão dos provetes foi o termoplástico Ácido Polilático (PLA), que é um dos polímeros mais utilizados atualmente para produzir componentes por FFF. De modo a tornar o presente estudo o mais coerente possível, tanto o PLA granulado utilizado na produção dos provetes injetados, como o filamento de PLA para os provetos impressos, foram obtidos do mesmo lote para não influenciar os resultados. Todo o material foi fornecido pela empresa BEEVERYCREATIVE [74]. A Tabela 5.3 apresenta as propriedades do filamento do PLA utilizado.

Tabela 5.3: Especificações do filamento de PLA.

Propriedades	Valores
Diâmetro	$1,75 \pm 0,05$ mm
Tolerância geométrica	max 3%
Temp. de impressão sugerida	215°C
Vel. de impressão sugerida	40–85 mm/s

5.3 Impressora e Software Utilizados

A impressora utilizada foi a BEETHEFIRST+ (Fig. 5.3) [75], gentilmente cedida pela empresa parceira deste projeto, a BEEVERYCREATIVE. Os provetes foram projetados recorrendo ao programa Solidworks, sendo depois convertidos para STL. Para a geração do código de impressão foi utilizado o software Simplify3D. A utilização do Simplify3D deveu-se à necessidade de utilizar o ângulo de preenchimento de 0° apenas, sendo que software gratuito como o Slic3r e o Cura, automaticamente criam camadas alternando o ângulo de preenchimento em 90° entre si. Estando o ficheiro com o código G gerado, este é importado para o BEESOFT, software utilizado nas impressoras da BEE, que trata de enviar o código de impressão para a impressora (Fig. 5.4) [76].

O bico extrusor da impressora apresenta um diâmetro de 0,4 mm, sendo um dos detalhes tidos em conta para a escolha dos valores de largura e altura utilizados nas combinações.

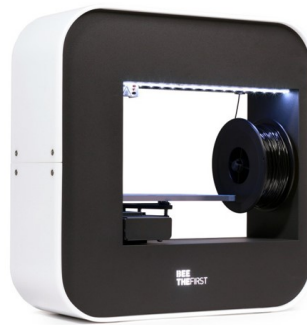


Figura 5.3: Impressora BEETHEFIRST+ [75].



Figura 5.4: Software e procedimento.

5.4 Testes e Normas

5.4.1 Testes de Tração

Para aferir as propriedades mecânicas dos provetes processados, realizaram-se ensaios de tração. Para tal foi utilizada uma *Universal Testing Machine* (UTM) da série AGS-X da marca Shimadzu (apresentada na Figura 5.5). Para melhor aferir o deslocamento, foi utilizado um vídeo-extensómetro.

Este tipo de ensaio permite retirar dados como a resistência à tração e deformação de rutura do material, e o módulo de Young (ou de elasticidade). De modo a realizar os ensaios de uma forma correta para obter resultados válidos, teve-se em conta vários aspetos tais como a velocidade adequada do ensaio, a correta fixação do provete de modo a este ficar perfeitamente alinhado, entre outros.

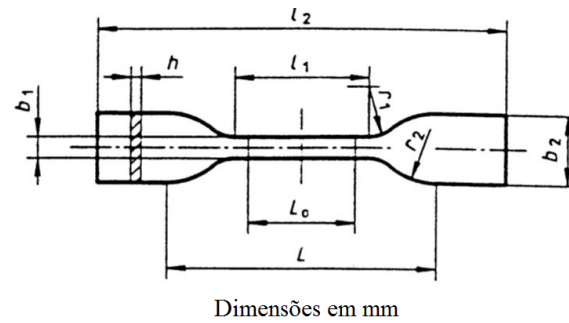


Figura 5.5: Máquina dos ensaios de tração, modelo Shimadzu AGS-X.

5.4.2 Norma ISO 527-2:1996

Produziram-se provetes através do processo FFF e comparados com provetes produzidos por injeção de plástico, para uma melhor comparação das propriedades mecânicas dos diferentes provetes [77]. Todos os provetes foram produzidos tendo em conta o provete do tipo 5A, presente na norma ISO 527-2:1996 (Fig. 5.6) [78]. Uma vez que o molde utilizado para produzir os provetes por injeção está de acordo com a norma referida, optou-se por produzir provetes por impressão de acordo com a mesma norma de modo a proporcionar uma comparação de resultados mais coerente. A velocidade do ensaio foi de 1 mm/min, como aconselha a norma utilizada.

Outro aspeto importante é o número de provetes a produzir. Como objetos produzidos por FFF apresentam anisotropia, é aconselhável criar um número razoável de provetes para uma melhor avaliação dos resultados. Assim, foram produzidos 10 provetes para cada combinação. As propriedades mecânicas estudadas foram: tensão uniaxial, deformação de rutura e o módulo de elasticidade (ou de Young).



Tipo do provete	5A
l_2 Comprimento total, mínimo	≥ 75
b_2 Largura nas extremidades	$12,5 \pm 1$
l_1 Comprimento da parte estreita	25 ± 1
b_1 Largura da parte estreita	4 ± 1
r_1 Raio menor	$8 \pm 0,5$
r_2 Raio maior	$12,5 \pm 1$
L Distância inicial entre apertos	50 ± 2
L_0 Comprimento de medida	$20 \pm 0,5$
h Espessura	≥ 2

Figura 5.6: Provete do tipo 5A da norma ISO 527-2:1996 [78].

Cálculo da tensão uniaxial

A tensão mecânica é o resultado da força aplicada por determinada área transversal, dada pela equação 5.1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

- σ é o valor da tensão, expresso em MPa;
- F é a força medida, expressa em N;
- A é referente à área inicial da zona estreita do provete, expresso em mm^2 [78].

Cálculo da deformação de rutura

Em relação à deformação de rutura, esta pode ser obtida pelas equações 5.2 e 5.3.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon(\%) = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (5.3)$$

- ε é o valor da deformação, adimensional ou em %;
- L_0 é o comprimento de medida, expressa em mm;
- ΔL_0 é a extensão do comprimento do provete, expresso em mm [78].

Cálculo do Módulo de Young

A equação 5.4 é utilizada para calcular o Módulo de Young.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5.4)$$

- E é o Módulo de Young, expresso em MPa;
- σ_1 é a tensão medida quando $\varepsilon_1 = 0,0005$, expressa em MPa;
- σ_2 é a tensão medida quando $\varepsilon_2 = 0,0025$, expressa em MPa [78].

5.5 Procedimento

Antes de iniciar a impressão dos provetes, foi necessário preparar a impressora para um correto funcionamento. Assim, começou-se por introduzir o filamento a utilizar (Fig. 5.7). Através do BEESOFT, de uma forma simples e intuitiva, é explicado a maneira correta de colocação do filamento a usar, sendo necessário elevar a temperatura do bico extrusor, como indica a Figura 5.8.

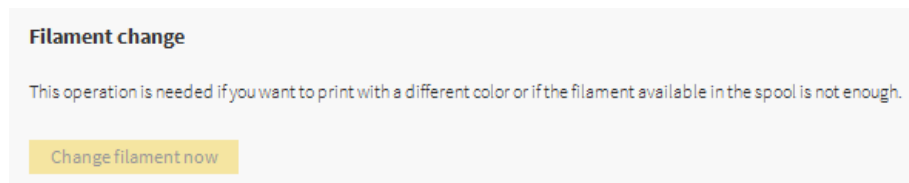


Figura 5.7: Mudança de filamento.

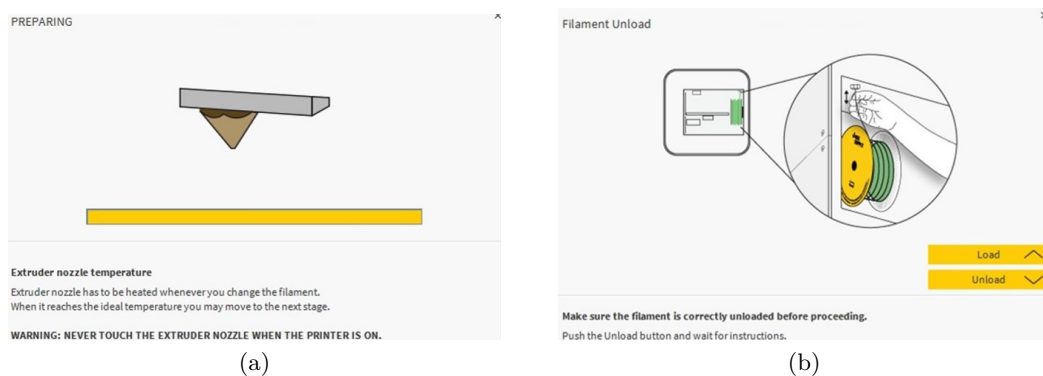


Figura 5.8: Procedimento para colocação o filamento: (a) Aquecimento do bico extrusor, (b) Remoção/Inserção do filamento.

Com o filamento inserido, foi necessário proceder à calibração da impressora (Fig. 5.9). Esta calibração também é feita através do BEESOFT, que indica o procedimento a seguir para uma boa calibração, sendo que no final da calibração é possível fazer um teste para avaliar se a calibração foi ou não bem sucedida (Fig. 5.10) [76].

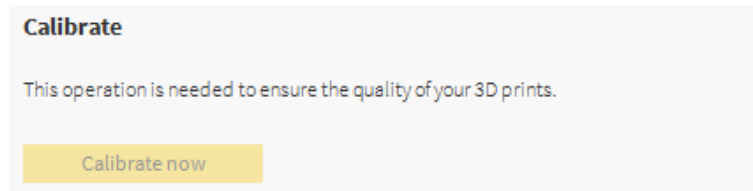


Figura 5.9: Calibração.

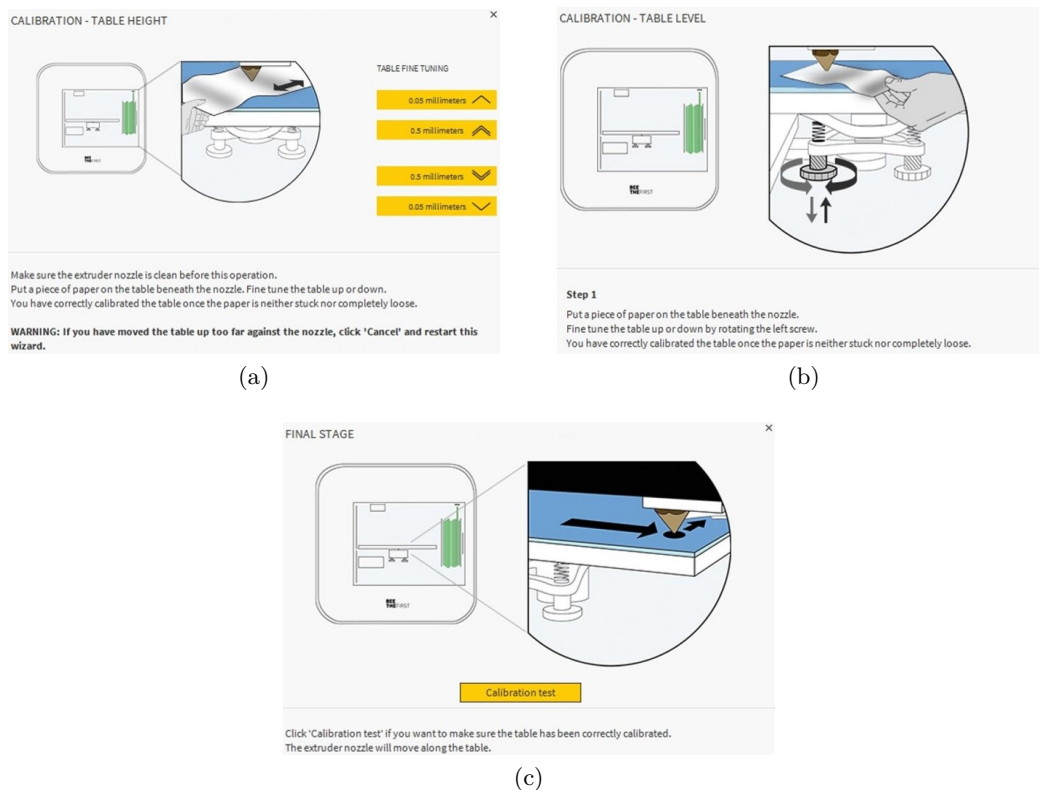


Figura 5.10: Procedimento para calibrar a impressora: (a) Altura da mesa, (b) Nível da mesa, (c) Teste de calibração.

Neste momento a impressora está pronta a imprimir. A temperatura de extrusão utilizada é de 210°C, valor esse aconselhável para o material utilizado. Como a impressão dos provetes será realizada em ambiente de temperatura e humidade do ar controlado, foi necessário recorrer à utilização de uma câmara climática. Desta forma é possível assegurar que a humidade e temperatura do ar envolvente são as mesmas para todos os provetes, eliminando a possibilidade de adulteração dos resultados. A câmara climática utilizada foi a TIRA clima TCC 4034, presente na Figura 5.11, sendo que foi fixada a

temperatura e a humidade em 24°C e 50%, respetivamente. Estes valores foram escolhidos tendo em conta condições ideais de conforto, sendo que impressoras deste género normalmente são utilizadas em espaços com ambiente controlados, como é o caso dos escritórios.



Figura 5.11: Câmara climática, modelo TIRAclima TCC 4034.

Iniciou-se assim, a impressão dos provetes. Como referido anteriormente, começou-se pelo estudo das orientação que serviu para analisar a capacidade da impressora em imprimir a mesma peça em diferentes orientações (Fig. 5.2), avaliando a influência dessa variação nas propriedades mecânicas das peças. Assim, utilizaram-se parâmetros idênticos para todos os provetes de modo a variar apenas a orientação, parâmetros esses apresentados na Tabela 5.4. Em relação ao ângulo de preenchimento, ângulo que se refere à amplitude criada pelo filamento depositado e o eixo Ox , usaram-se valores para tornar os provetes equivalentes. Sendo que para o provete com uma orientação de 0° se utilizou um ângulo de preenchimento de -45°/45°, para os restantes utilizou-se os valores presentes na Tabela 5.5.

Tabela 5.4: Valores pré-definidos - Orientação.

Parâmetros	Valor
Temp de Extrusão da 1ª camada [°C]	215
Temp de Extrusão [°C]	210
Velocidade de Impressão [mm/min]	2340
Espessura da Camada [mm]	0,30
Largura da Camada [mm]	0,40
Preenchimento [%]	60

Tabela 5.5: Orientação e ângulo de preenchimento.

Orientação	Â. de preenchimento
30°	-15°/75°
45°	0°/90°
60°	15°/105°
90°	45°/-45°

Como o objetivo principal passa por avaliar a influência de vários parâmetros de impressão, o mais correto é desprezar o uso de camadas inferiores e superiores nos provetes, sendo que o perímetro também deve ser o mínimo possível. As camadas inferiores e superiores referem-se às primeiras e últimas camadas, 100% preenchidas e com ângulos de preenchimento de -45°/45°, da peça a imprimir. Estas camadas servem para dar uma maior estabilidade e resistência à peça, o que interfere nos resultados dos ensaios. Assim, avaliou-se a possibilidade de desprezar as camadas envolvidas ou utilizar duas camadas superiores e duas camadas inferiores. Escolheram-se valores que à partida podem causar problemas, *e.g.* uma baixa percentagem de preenchimento e diferentes ângulos de preenchimento.

Imprimiram-se três diferentes provetes, todos com 20% de preenchimento e com a variação do ângulo de preenchimento entre 0°, 45° e 90° (representados na Figura 5.12).

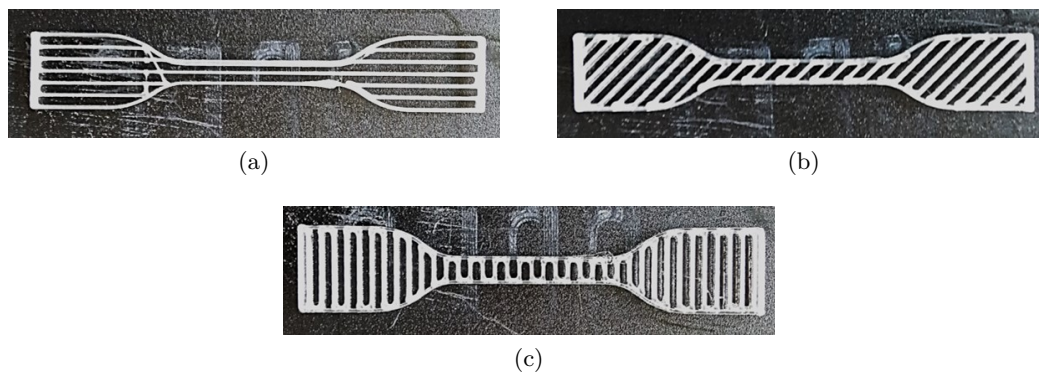


Figura 5.12: Provetes com 20% de preenchimento: (a) Ângulo 0°, (b) Ângulo 45°, (c) Ângulo 90°.

Estando a orientação e o uso de camadas envolvidas estudados, imprimiram-se 10 provetes para cada combinação da Tabela 5.2 com uma orientação de 30° (Fig. 5.13) e quatro camadas envolvidas.

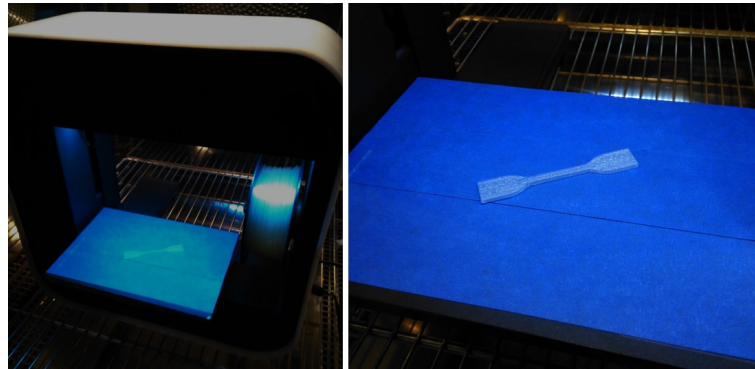


Figura 5.13: Provetes impressos a 30°.

Com a análise aos resultados das combinações do método de Taguchi, percebeu-se que os valores obtidos estavam incoerentes com a literatura. Assim, decidiu-se imprimir novas combinações de forma a conseguir estudar cada parâmetro separadamente (Tab. 5.6) e numa fase posterior, foi realizado um segundo método de Taguchi, com o preenchimento fixo em 100% (Tab. 5.7).

Tabela 5.6: Combinações extras impressas.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]
C10	0,10	0	0,48	20
C11	0,10	0	0,56	20
C12	0,30	0	0,48	20
C13	0,30	-45/45	0,48	20

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento

C: Largura da Camada; D: Preenchimento

Tabela 5.7: Matriz do método de Taguchi revisto.

Ensaio/Param	Espessura [mm]	Â. Preenchimento [°]	Largura [mm]
CB1	0,10	0	0,40
CB2	0,10	-45/45	0,48
CB3	0,10	0/90	0,56
CB4	0,20	0	0,48
CB5	0,20	-45/45	0,56
CB6	0,20	0/90	0,40
CB7	0,30	0	0,56
CB8	0,30	-45/45	0,40
CB9	0,30	0/90	0,48

5.6 Aplicação dos Modelos de Previsão

Como referido anteriormente, aplicaram-se modelos de previsão das propriedades mecânicas das peças. Abordaram-se modelos como a Lei das Misturas e alguns modelos de previsão para materiais celulares, assim como, o procedimento relacionado com Redes Neurais Artificiais (ver capítulo 4).

5.6.1 Modelos Analíticos

O estudo feito passou pelo uso da Lei das Misturas e dos modelos analíticos utilizados para a previsão das propriedades de materiais celulares, exemplo das espumas sólidas. Nos modelos analíticos apenas se utilizaram as combinações do método de Taguchi preliminar (Tab. 5.2), uma vez que com apenas esses arranjos de parâmetros já é possível ter uma perceção da adequação de cada modelo. Em relação à RNA, todos os provetes impressos foram utilizados.

Lei das Misturas

De modo a enquadrar este método no presente estudo, tratou-se os provetes impressos como sendo um material compósito composto por ar (espaços vazios existentes dentro do provete) e pela matriz polimérica. Não tendo os espaços vazios qualquer módulo de elasticidade, o limite inferior torna-se impossível de calcular, e por isso apenas se calculou o modelo de Voigt. Para utilizar a Equação 4.1, pesaram-se todos os provetes para determinar a fração volúmica correspondente ao polímero e aos espaços vazios de cada combinação.

Como a altura da peça impressa corresponde a um múltiplo da espessura da camada utilizada, nas combinações com uma espessura de deposição de 0,3 mm, o volume real torna-se superior ao volume das restantes combinações. Sendo a espessura total do provete de 2 mm, espessuras de deposição de 0,1 mm e 0,2 mm são múltiplas, ao contrário da espessura de 0,3 mm que obtém uma espessura de provete de 2,1 mm. Com o objetivo de comparar todos os valores de igual forma, alteraram-se as massas reais das combinações em causa para valores de massa que as combinações teriam para o volume de 1,3016 cm³. As massas referentes a estas combinações (combinação 7, 8 e 9) (Tab. 6.24) foram obtidas através das Equações 5.5 e 5.6.

$$\rho_{\text{real}} = \frac{m_{\text{real}}}{v_{\text{real}}} \quad (5.5)$$

$$m_{1,3016} = \rho_{\text{real}} \times 1,3016 \quad (5.6)$$

- ρ_{real} é a massa volúmica, em g/cm³;
- m_{real} é a massa real do provete, em g;
- v_{real} é o volume real do provete, em cm³.

Modelos de Previsão para Materiais Celulares

Utilizaram-se modelos, tanto para espumas de estruturas porosas abertas como para estruturas fechadas, uma vez que os provetes impressos se podem adequar a ambos os tipos de modelo, dependendo da perspectiva. Se se desprezar as camadas envolvidas, o provete assume uma estrutura aberta visto que os poros estão ligados entre si apenas por arestas. Se se tiver em conta o provete na sua totalidade, os modelos utilizados para espumas de estrutura porosa fechada são mais apropriados. A Figura 5.14 representa as duas perspectivas mencionadas.

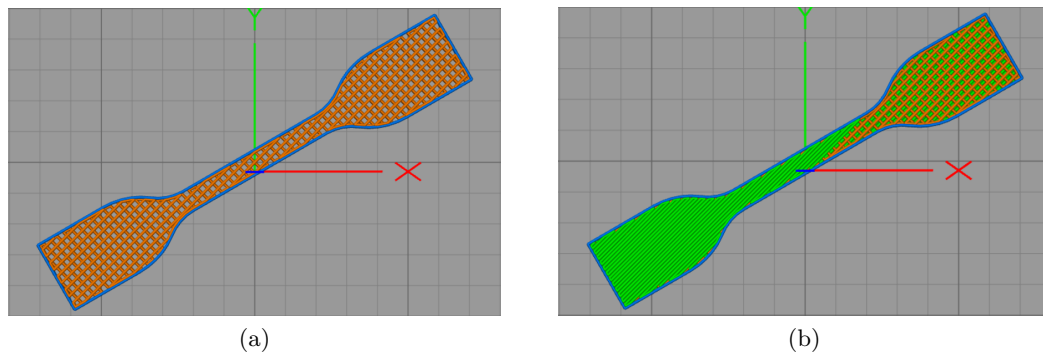


Figura 5.14: Considerações para os modelos de previsão para materiais celulares: (a) Estrutura aberta, (b) Estrutura fechada.

Em relação aos modelos escolhidos, decidiu-se utilizar o modelo criado por Gibson e Ashby por ser um modelo generalista, e o modelo de Simone e Gibson devido às espessuras utilizadas na impressão dos provetes serem regulares, uma vez que este modelo é adequado para estruturas com espessuras uniformes. A escolha do modelo de Rens e Ehrenstein deveu-se a este considerar que todo o polímero se encontra nas paredes das células. Calcularam-se as densidades e densidades relativas de cada combinação uma vez que são parâmetros necessários para utilizar as Equações 4.3 a 4.5.

5.6.2 Redes Neurais Artificiais

Decidiu-se escolher o Matlab por ser considerada uma ferramenta ideal para trabalhar com redes neurais artificiais, visto que é bastante eficiente na realização de cálculos vetoriais e matriciais. Para além disso, possui um ambiente dedicado exclusivamente para redes neurais (*Neural Network Toolbox*) que dispõe de uma série de ferramentas úteis para este tipo de estudo [79].

Havendo uma lista de vários tipos de redes neurais consoante a funcionalidade pretendida, escolheu-se o *Fitting Tool (nftool)* por ser a opção mais adequada para o presente estudo (Fig. 5.15). Esta opção permite delinear um trajeto entre *inputs* e *outputs* em casos em que ambos são ensinados à rede. Em relação aos *inputs* foram tidos em conta os parâmetros de impressão estudados (espessura, ângulo de preenchimento, largura e percentagem de preenchimento). Por sua vez, os *outputs* foram os valores de resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young. Resumindo, escolheu-se

quatro *inputs* e três *outputs*.

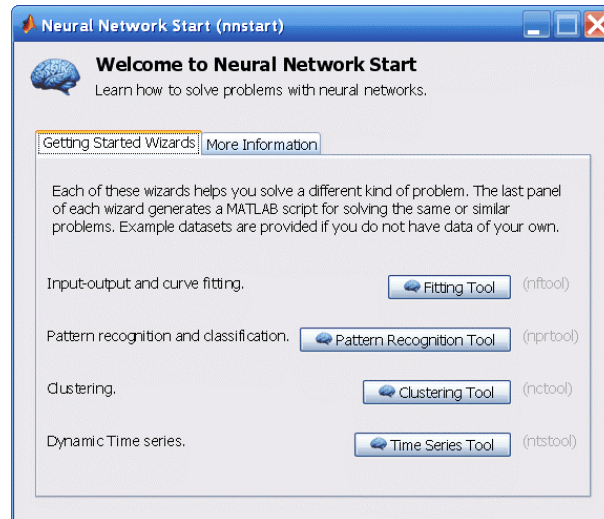


Figura 5.15: *Neural Network Start* (nnstart) [79].

Escolhidos os *inputs* e respetivos *outputs*, foi necessário escolher as percentagens das amostras referentes a treino, validação e teste. A percentagem de amostras alusivas ao treino refere-se à quantidade de amostras que são utilizadas na aprendizagem. Para a validação, são o número de combinações utilizadas para validar a generalização da rede e interromper o treino quando não for possível um maior aperfeiçoamento. Por fim, a percentagem de amostras pertencentes ao teste são amostras que não foram ensinadas e são utilizadas para testar de forma completamente independente a generalização da rede e analisar a validade dos resultados obtidos [79]. Todos os dados, provenientes dos ensaios aos provetes impressos, foram fornecidos à rede de modo a conseguir o maior número de amostras possível (235 amostras). A Tabela 5.8 indica as percentagens de cada fase e consequentemente o número de amostras.

Tabela 5.8: Percentagem de amostras para treino, validação e teste.

Fase	Percentagem	Amostras
Treino	85	199
Validação	5	12
Teste	10	24

Sendo um número reduzido de amostras, seria desnecessário um elevado número de camadas ocultas visto que poderia até diminuir a eficiência da rede. Tendo este aspeto em mente, decidiu-se treinar a rede variando o número de camadas ocultas entre 2 e 6, obtendo um menor erro com 5 camadas intermédias. A rede criada pode ser considerada híbrida, uma vez que também consegue prever propriedades de parâmetros não utilizados, *e.g.* espessura da camada de 0,15 mm. A Figura 5.16 mostra a estrutura da rede neuronal obtida.

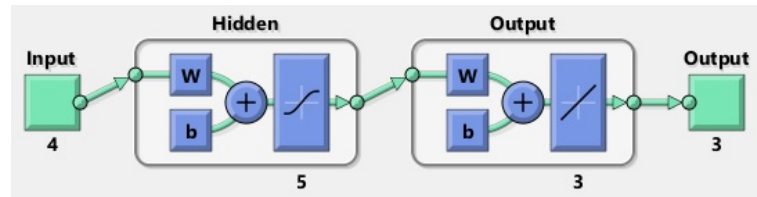


Figura 5.16: Rede Neuronal com 4 inputs, 3 outputs e 5 camadas ocultas.

Estando o número de camadas ocultas escolhidas e as percentagens de amostras para cada fase definidas, passou-se então à fase de treino. Foi possível utilizar três algoritmos diferentes, sendo que se obteve melhores resultados com o algoritmo Levenberg-Marquardt. Este algoritmo tipicamente utiliza uma maior memória, mas menos tempo, sendo recomendado para a maioria dos problemas deste tipo [79].

Parte III

Resultados e Discussão

Capítulo 6

Resultados Experimentais e Discussão

Ao longo deste capítulo, são apresentados todos os resultados experimentais provenientes dos ensaios preconizados. São referidos os dados provenientes das combinações realizadas na primeira iteração do método de Taguchi, das combinações extras e das combinações da segunda iteração do método de Taguchi, sendo que os resultados referentes aos provetes obtidos por injeção também se encontram detalhados. Outro aspeto abordado é a percentagem de preenchimento real dos provetes. O presente capítulo engloba de igual forma os resultados obtidos com os modelos de previsão.

6.1 Orientação

Após a realização dos ensaios mecânicos aos provetes utilizados no estudo da orientação, obteve-se as curvas do comportamento presentes na Figura A.1 (Apêndice A), e os valores médios estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young – Orientação.

Orientação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
0°	$27,00 \pm 0,96$	$1,36 \pm 0,19$	$2,74 \pm 0,39$
30°	$26,29 \pm 0,67$	$1,37 \pm 0,19$	$2,82 \pm 0,34$
45°	$26,92 \pm 0,61$	$1,42 \pm 0,23$	$2,77 \pm 0,46$
60°	$28,59 \pm 0,96$	$1,37 \pm 0,30$	$3,54 \pm 0,58$
90°	$27,20 \pm 0,63$	$1,41 \pm 0,24$	$3,04 \pm 0,39$

Como se pode verificar na Tabela 6.1, a melhor resistência à tração e módulo de Young foram obtidos com uma orientação de 60° sendo por isso, aparentemente, a orientação ideal para utilizar nas restantes combinações dos provetes. No entanto, como o objetivo principal da presente dissertação passa por avaliar a influência dos diversos parâmetros de impressão, torna-se preferível utilizar uma orientação cujo comportamento seja praticamente idêntico em todos os provetes. Assim, consegue-se uma repetibilidade nos ensaios, reduzindo o erro associado à orientação conseguindo-se avaliar de forma mais precisa a influência dos restantes parâmetros.

Os gráficos da Figura 6.1 apresentam os resultados para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade com o respetivo desvio experimental.

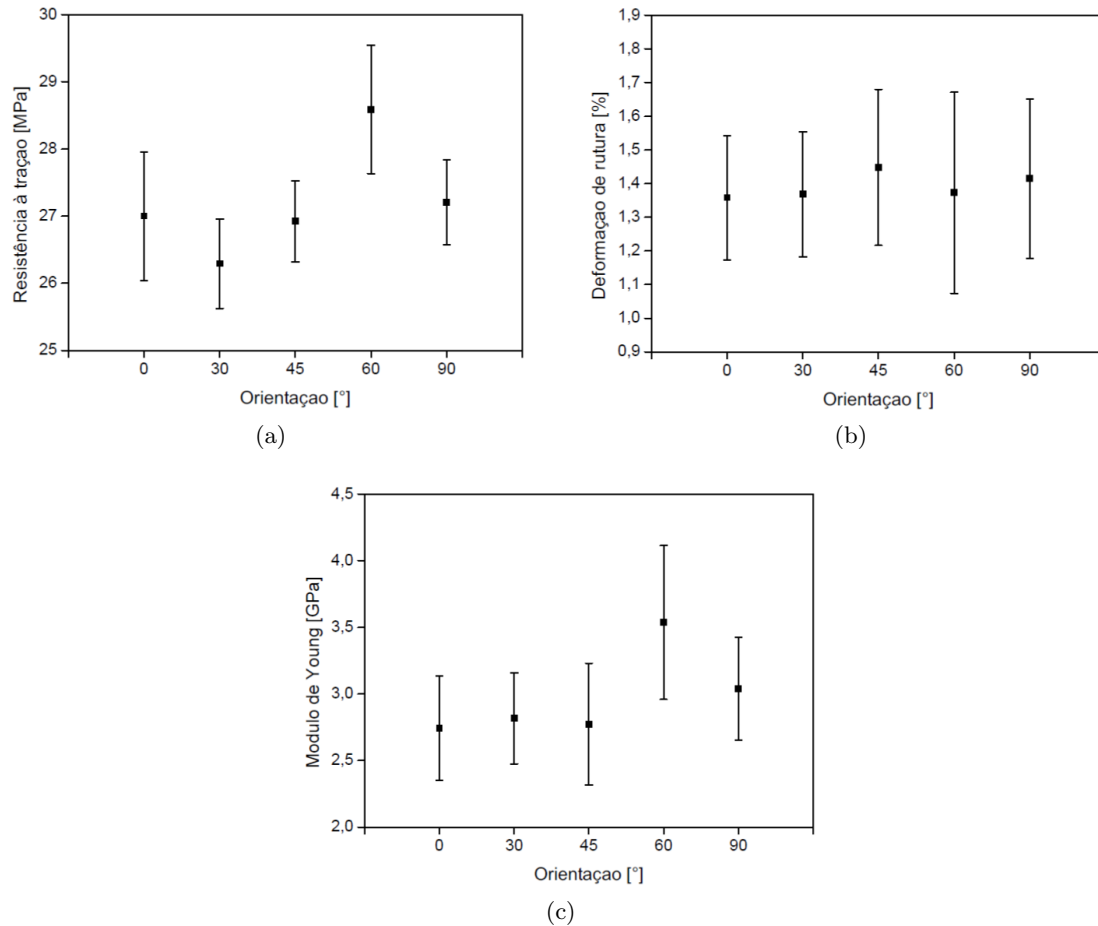


Figura 6.1: (a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young, em função da orientação.

Os valores obtidos para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade para uma orientação de 60° são os que apresentam desvios superiores. Analisando as restantes orientações, verifica-se que a melhor orientação é a de 30° uma vez que foi a orientação com que se obtiveram curvas com maior semelhança entre si.

Em relação aos desvios obtidos na resistência à tração, estes podem induzir em erro uma vez que valores de resistência idênticos não significa concretamente que as curvas tenham um comportamento semelhante, efeito esse que pode ser identificado nas curvas de tensão-deformação obtidas para a orientação de 90° (Fig. 6.2).

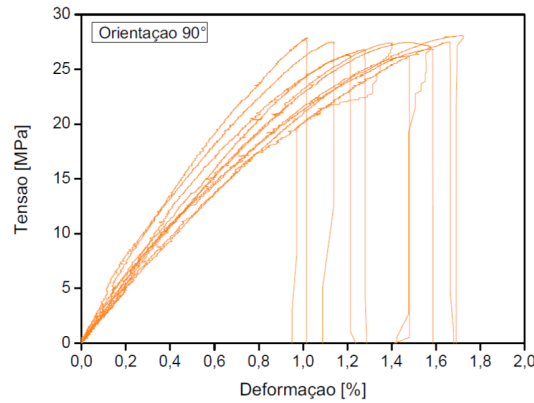


Figura 6.2: Curva Tensão-Deformação para uma orientação de 90° .

6.2 Camadas Envolventes

Fazendo ensaios aos provetes com 20% de preenchimento e diferentes ângulos de preenchimento (referidos na Figura 5.12), concluiu-se que seria vantajoso incluir duas camadas inferiores e superiores aos provetes visto que estes apresentaram uma elevada instabilidade durante os ensaios, como representa a Figura 6.3. A Figura 6.4 apresenta a curva Tensão-Deformação do provete com ângulo de preenchimento de 0° e sem camadas envolvidas.

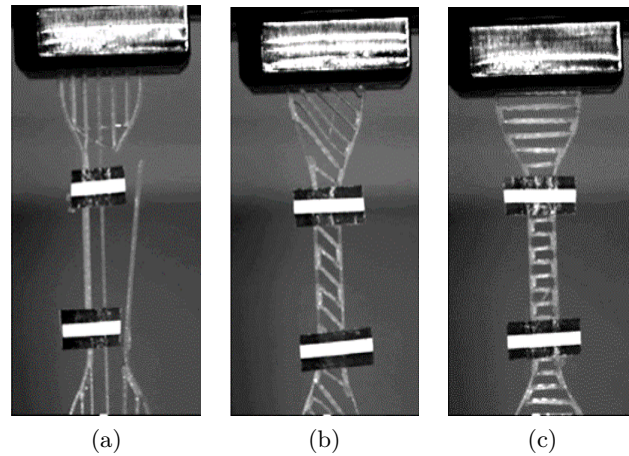


Figura 6.3: Instabilidades existentes nos provetes: (a) Ângulo 0° , (b) Ângulo 45° , (c) Ângulo 90° .

De modo a tornar o erro associado à utilização das quatro camadas o menor possível, todos os provetes foram impressos com as duas camadas superiores e inferiores, à exceção dos provetes impressos para o estudo da orientação. Para perceber a importância destas camadas envolvidas na correta realização dos ensaios, é apresentado na Figura 6.5 ambas as opções seguidas (com e sem camadas envolvidas). A Figura 6.5 encontra-se com maior detalhe no Apêndice B.

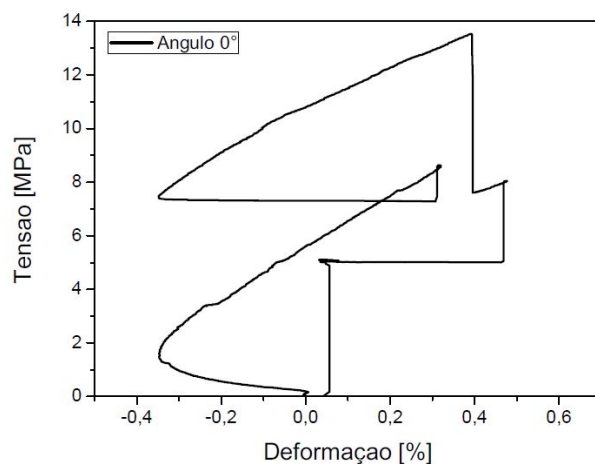


Figura 6.4: Curva Tensão-Deformação do provete com ângulo de preenchimento 0°.

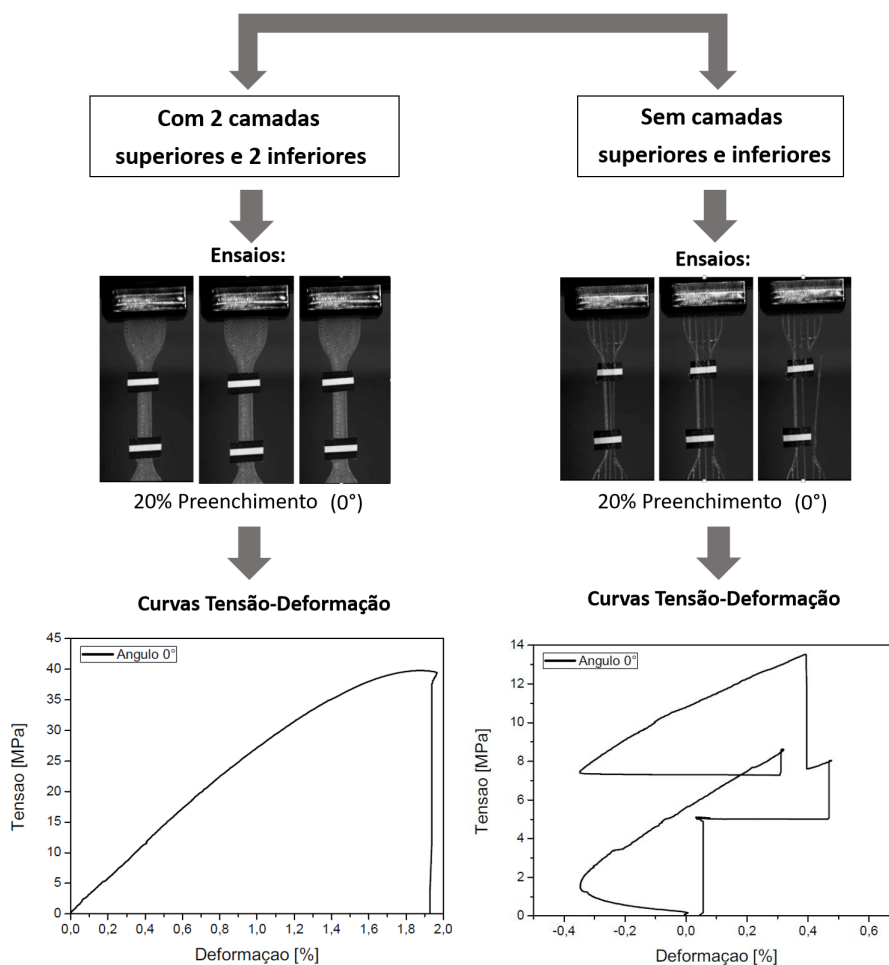


Figura 6.5: Desenho esquemático do efeito das camadas envolvidas.

6.3 Método de Taguchi preliminar

Devido às várias etapas necessárias para efetuar a análise de resultados pelo método de Taguchi, apenas estão expostos os pontos de maior relevância [80]. Contudo, por forma a mostrar detalhadamente toda a análise efetuada, o método encontra-se desenvolvido no Apêndice C.

Através dos ensaios de tração feitos às combinações da Tabela 6.2, calcularam-se os valores de resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young, apresentados na Tabela 6.3. Na Figura 6.6 apresentam-se a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young e respetivos desvios, para as diferentes combinações.

Tabela 6.2: Matriz ortogonal L9 do método de Taguchi preliminar.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]
C1	0,10	0	0,40	20
C2	0,10	−45/45	0,48	60
C3	0,10	0/90	0,56	100
C4	0,20	0	0,48	100
C5	0,20	−45/45	0,56	20
C6	0,20	0/90	0,40	60
C7	0,30	0	0,56	60
C8	0,30	−45/45	0,40	100
C9	0,30	0/90	0,48	20

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento

C: Largura da Camada; D: Preenchimento

Tabela 6.3: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as diferentes combinações.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
C1	27,91 \pm 1,38	2,13 \pm 0,39	1,93 \pm 0,20
C2	35,35 \pm 1,52	2,90 \pm 0,42	2,59 \pm 0,56
C3	54,15 \pm 1,25	3,10 \pm 0,60	3,53 \pm 0,45
C4	52,44 \pm 1,49	4,46 \pm 0,42	3,90 \pm 0,44
C5	33,80 \pm 1,18	2,78 \pm 0,50	2,55 \pm 0,40
C6	42,15 \pm 0,47	2,21 \pm 0,27	3,51 \pm 0,40
C7	49,45 \pm 1,09	3,37 \pm 0,66	3,45 \pm 0,44
C8	50,94 \pm 1,32	3,64 \pm 0,43	3,58 \pm 0,43
C9	39,68 \pm 0,61	2,50 \pm 0,35	2,64 \pm 0,56

Analisando os valores de resistência à tração percebe-se que a combinação C3 foi a que obteve maior valor (54,15 \pm 1,25 MPa), seguida das combinações C4 e C8 (com 100% de preenchimento). Um dado curioso prende-se ao facto de combinações com menores percentagens de preenchimento conseguirem resultados superiores ou idênticos a combinações com maiores percentagens. É o caso da combinação C9 (20% de preenchimento) que apresenta uma resistência à tração superior à da combinação C2 (60% de preenchimento), ou da combinação C7 (60% de preenchimento) que possui uma resistência

à tração semelhante à da combinação C8. Tendo em conta os tempos de impressão de cada combinação, verifica-se que o tempo de impressão da combinação C9 realça ainda mais a vantagem em relação à combinação C2. Utilizando menores quantidades de material e obtendo melhores propriedades mecânicas, a combinação C9 detém um tempo de impressão inferior em mais de sete minutos face à combinação C2. Esta combinação de fatores mostra uma das vantagens possíveis face à concorrência, caso se perceba a influência dos restantes parâmetros de impressão. Os tempos de impressão encontram-se referidos na Tabela D.1, presente no Apêndice D.

Em relação à deformação de rutura, os dados obtidos apresentam um desvio superior aos valores de resistência à tração uma vez que as peças são anisotrópicas. A combinação C1 apresenta a melhor deformação de rutura ($2,13 \pm 0,39$ %), enquanto que a pior deformação de rutura ($4,46 \pm 0,42$ %) foi obtida para a combinação C4.

No que diz respeito aos valores de módulo de Young, à exceção das combinações com 20% de preenchimento e da combinação C2, a maioria apresenta valores próximos de 3,50 GPa. A combinação C4 apresenta o maior valor ($3,90 \pm 0,44$ GPa), valor próximo do esperado. Uma possível razão que levou a grandes desvios é o módulo de elasticidade ser medido num pequeno intervalo de deslocamento no decurso do ensaio.

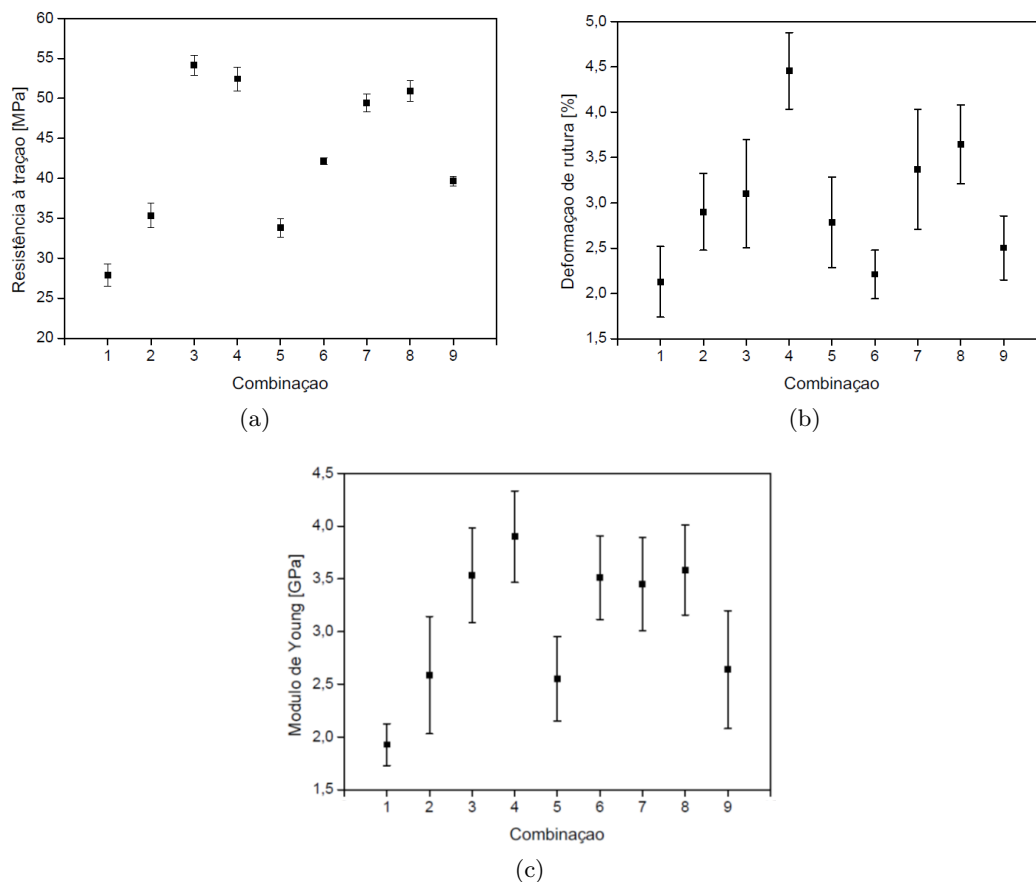


Figura 6.6: (a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young e respetivos desvios para as diferentes combinações.

6.3.1 Resistência à Tração

Nos gráficos da Figura 6.7 está representada a resistência à tração em função das variáveis e dos seus níveis. Analisando os gráficos verifica-se que existe alguma discordância entre estes e os valores de resistência à tração obtidos, sendo esta incongruência analisada e discutida adiante no presente documento. Os melhores resultados para a resistência à tração foram obtidos para as combinações C3 e C4 (espessura da camada de 0,1 mm e 0,2 mm, respetivamente). Por sua vez, os melhores ângulos de preenchimento foram os ângulos alternados de 0°/90°, e a largura de 0,56 mm. A Tabela 6.4 indica a combinação de parâmetros que detém melhor resistência à tração (CR), de acordo com a Figura 6.7.

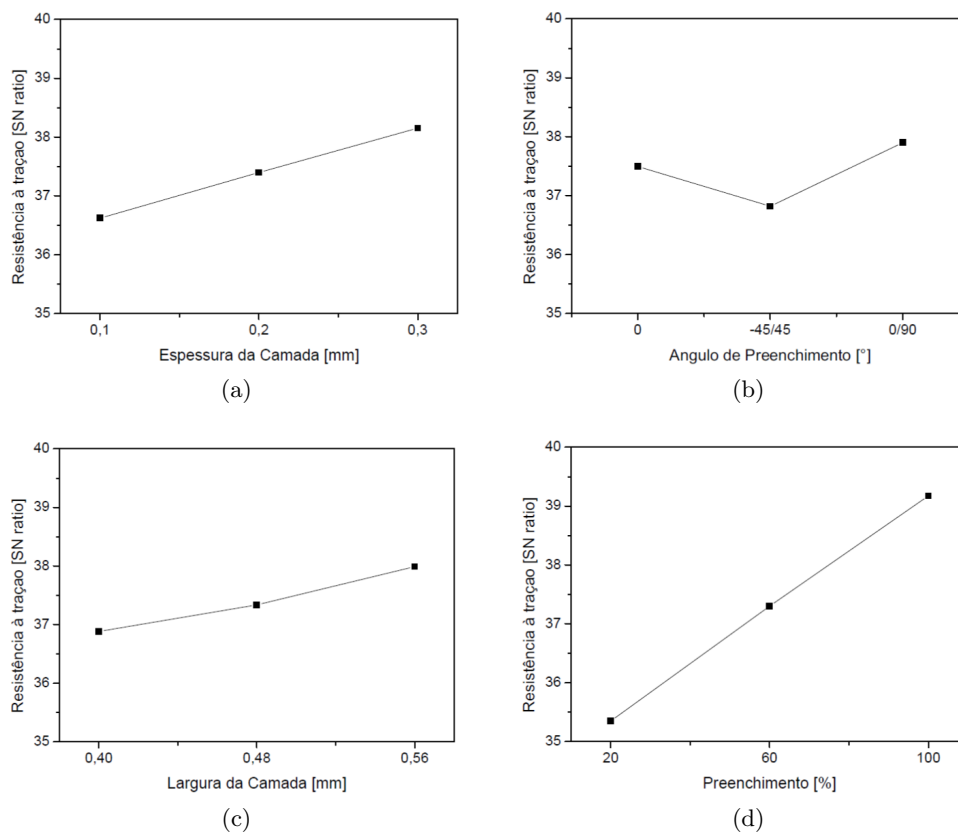


Figura 6.7: Resistência à tração: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.

Tabela 6.4: Parâmetros ideais – Resistência à tração (CR).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,3
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,56
Preenchimento [%]	100

6.3.2 Deformação de Rutura

Nos gráficos da Figura 6.8 são apresentados os resultados da deformação de rutura em função das variáveis e dos seus níveis. Analisando os gráficos, verifica-se que quanto menores os valores de deformação apresentados melhor. Assim, utilizou-se a razão de sinal *smaller is better*. Desta forma, verifica-se que o valor aconselhável para a espessura da camada é 0,1 mm, para o ângulo de preenchimento é 0°/90°, para a largura da camada é 0,4 mm e para o preenchimento 20% (combinação CD, presente na Tab. 6.5). O sinal de ruído negativo mostra que o ambiente apresenta bastante ruído.

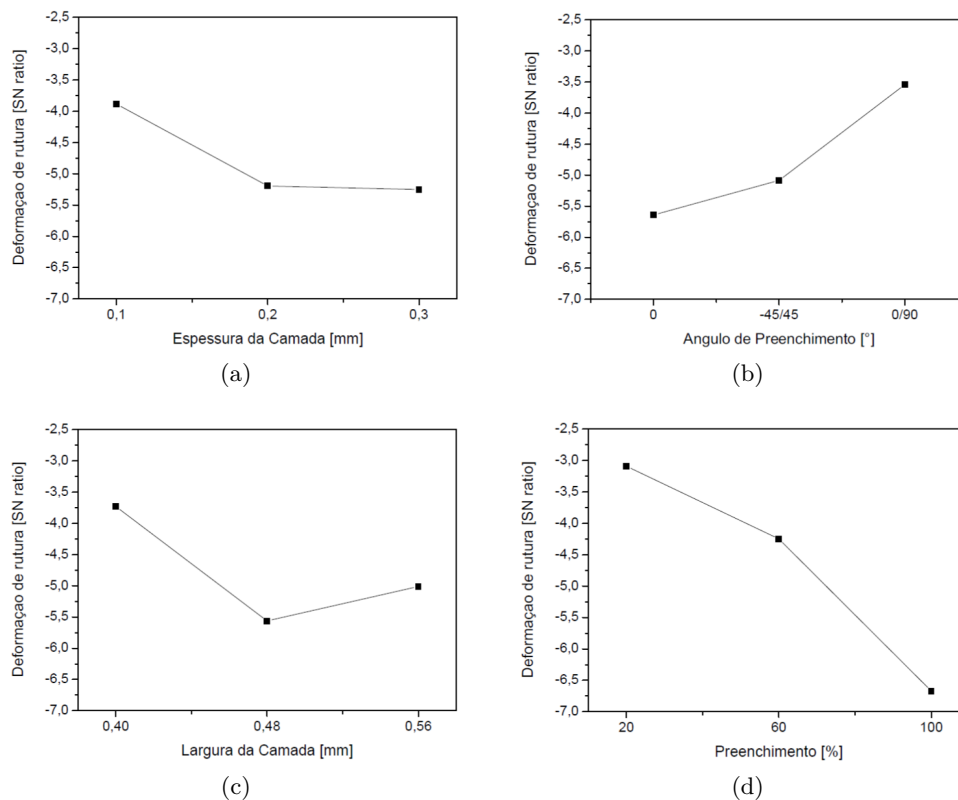


Figura 6.8: Deformação de rutura: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.

Tabela 6.5: Parâmetros ideais – Deformação de rutura (CD).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,1
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,4
Preenchimento [%]	20

6.3.3 Módulo de Young

Na Figura 6.8 são apresentados os gráficos dos resultados do módulo de Young em função das variáveis e dos seus níveis, resultados esses que estão coerentes com os resultados experimentais. Referente ao gráfico da espessura da camada, as espessuras de 0,2 mm e 0,3 mm apresentam resultados próximos. O mesmo acontece para o ângulo de preenchimento, em que os ângulos 0° e $0^\circ/90^\circ$ parecem ter influência semelhante. Por sua vez, a largura não parece ter uma grande influência sendo que, em questões de preenchimento, os melhores valores foram obtidos para um preenchimento de 100%. A Tabela 6.6 apresenta a combinação ideal (combinação CMY).

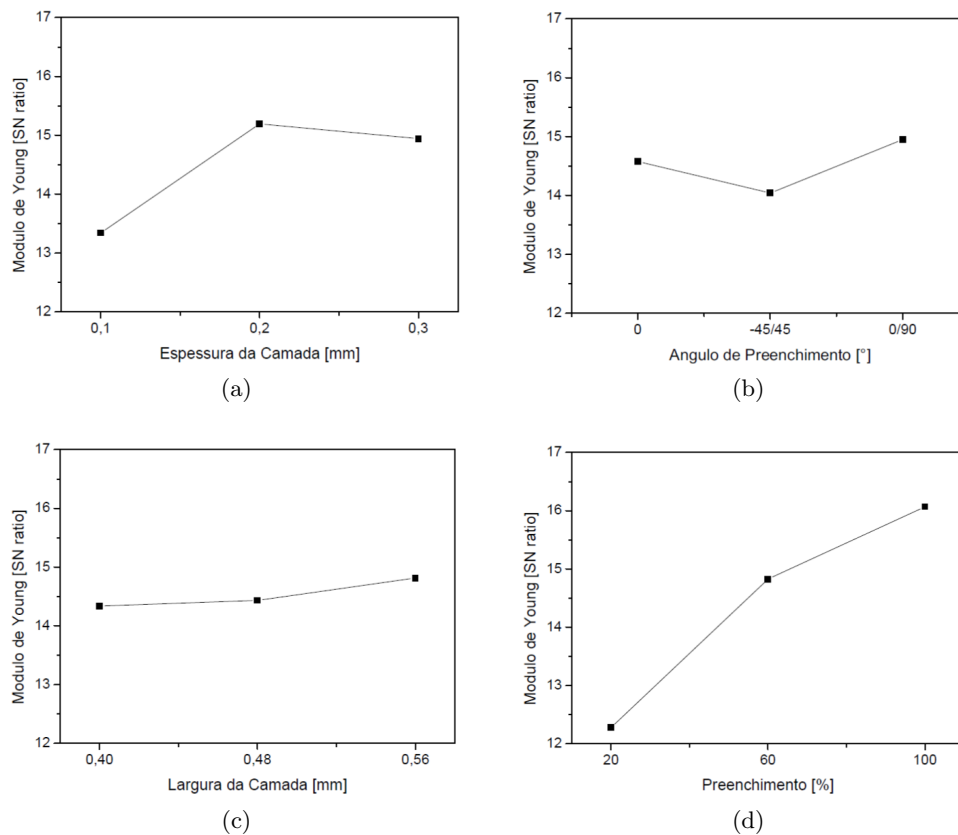


Figura 6.9: Módulo de Young: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.

Tabela 6.6: Parâmetros ideais – Módulo de Young (CMY).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,2
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,56
Preenchimento [%]	100

Na Tabela 6.7 são apresentados os valores para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade para as combinações ótimas. Analisando a tabela, percebe-se que as melhores propriedades não foram atingidas. Como analisado anteriormente, os gráficos parecem não estar em harmonia com os resultados experimentais das combinações, o que poderá denotar algumas anomalias. Os resultados da Tabela 6.7 vieram validar a incoerência verificada previamente.

Tabela 6.7: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young, para as combinações ótimas.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
CR	$40,78 \pm 2,75$	$2,50 \pm 0,83$	$2,88 \pm 0,26$
CD	$24,34 \pm 0,31$	$2,37 \pm 0,33$	$1,83 \pm 0,14$
CMY	$47,23 \pm 0,46$	$2,38 \pm 0,83$	$3,32 \pm 0,35$

A resistência à tração obtida neste método como sendo a melhor, é claramente inferior à que se esperaria. São várias as combinações ensaiadas que obtiveram melhores resultados no que toca a esta propriedade (combinações C3, C4, C6, C7 e C8), sendo que até a melhor combinação para o módulo de Young obteve uma resistência à tração superior. Comparando os parâmetros utilizados com as conclusões da literatura, percebe-se que existem algumas discrepâncias. Enquanto que pela análise aos gráficos da Figura 6.7, a melhor espessura seria de 0,3 mm, outros estudos como os de Sung-Hoon Ahn *et al.* [48], B.M. Tymrak *et al.* [49], G. C. Onwubolu *et al.* [50] entre outros, apontam para que a utilização de uma menor espessura leve a melhores resultados de resistência à tração. Relativamente ao ângulo de preenchimento, O.S. Carneiro *et al.* [56] e C. Ziemian *et al.* [61] concluíram que, utilizando um ângulo de 0° a resistência à tração era superior aos restantes casos, visto que desta forma os filamentos encontravam-se na direção axial. Contudo, Wenzheng Wu *et al.* [57] estudando a influência da espessura da camada e do ângulo de preenchimento, chegaram a melhores resultados de resistência à tração utilizando uma espessura de 0,3 mm e ângulos de preenchimento de $0^\circ/90^\circ$.

Em relação à deformação de rutura, o valor obtido não pode ser considerado como sendo o valor para a melhor deformação de rutura visto que a combinação C1 ($2,13 \pm 0,39$ %) e a combinação C6 ($2,21 \pm 0,27$ %) apresentam melhores valores de deformação de rutura.

Por sua vez, o módulo de elasticidade também não apresenta valores melhores, uma vez que mais de metade das combinações testadas apresenta um valor superior ao obtido (combinações C3, C4, C6, C7 e C8). B.M. Tymrak *et al.* [49], utilizando PLA, obtiveram melhores valores para o módulos de Young para espessuras de 0,2 mm, sendo que ângulos de preenchimento de $0^\circ/90^\circ$ e $-45^\circ/45^\circ$ obtinham resultados de módulo de elasticidade semelhantes entre si.

Como foi possível analisar na Tabela 6.7 e já referido anteriormente, os valores obtidos não foram de encontro ao esperado. Assim, para perceber se a anomalia descoberta depende de uma análise de Taguchi deficiente, imprimiram-se novas combinações de forma a conseguir analisar a variação de cada parâmetro separadamente (Tab. 6.8). Apesar dos resultados do método de Taguchi não serem os esperados, foram igualmente tidos em conta para uma posterior análise geral.

Tabela 6.8: Combinações extras impressas.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]
C10	0,10	0	0,48	20
C11	0,10	0	0,56	20
C12	0,30	0	0,48	20
C13	0,30	-45/45	0,48	20

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento

C: Largura da Camada; D: Preenchimento

6.4 Combinações Extra para Análise Individual

Esta secção apresenta a análise de dados feita às combinações possíveis de estudar para conseguir avaliar a influência de cada parâmetro de forma individual. Aproveitaram-se alguns resultados de combinações já criadas anteriormente e imprimiram-se outros protótipos com novas combinações, apresentadas na Tabela 6.8, que permitissem fazer uma avaliação específica. Na Tabela 6.9 estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos para as combinações extra.

Tabela 6.9: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações extra.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
C10	$27,32 \pm 2,36$	$1,52 \pm 0,31$	$2,22 \pm 0,26$
C11	$32,46 \pm 1,75$	$1,61 \pm 0,15$	$2,57 \pm 0,31$
C12	$39,99 \pm 0,55$	$1,97 \pm 0,22$	$2,90 \pm 0,24$
C13	$36,50 \pm 1,34$	$2,43 \pm 0,43$	$2,79 \pm 0,33$

Na Figura 6.10 estão representados os gráficos correspondentes à resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade e respetivos desvios, para as combinações extra. A resistência à tração da combinação C10 obteve um elevado valor de desvio em relação aos valores das restantes combinações. Isto pode dever-se à espessura de 0,1 mm e preenchimento de 20%, dado que a combinação C12 apenas difere na espessura (0,3 mm) e obtém um desvio muito inferior. Em relação à deformação de rutura (Fig. 6.10 (b)), o maior desvio obtido foi para a combinação C13 ($2,43 \pm 0,43$ %). Um possível motivo deve-se ao ângulo de preenchimento utilizado ($-45^\circ/45^\circ$). Para o preenchimento de 20%, existe a possibilidade das camadas terem uma elevada deformação de rutura, uma vez que ao longo do ensaio de tração as camadas têm tendência em ficar com a

mesma orientação da força aplicada. Uma ligação entre camadas menos eficiente poderá influenciar este acontecimento levando a maiores desvios. Tal como na primeira iteração do método de Taguchi, a causa dos desvios do módulo de Young pode ser o pequeno intervalo de deslocamento utilizado nos cálculos.

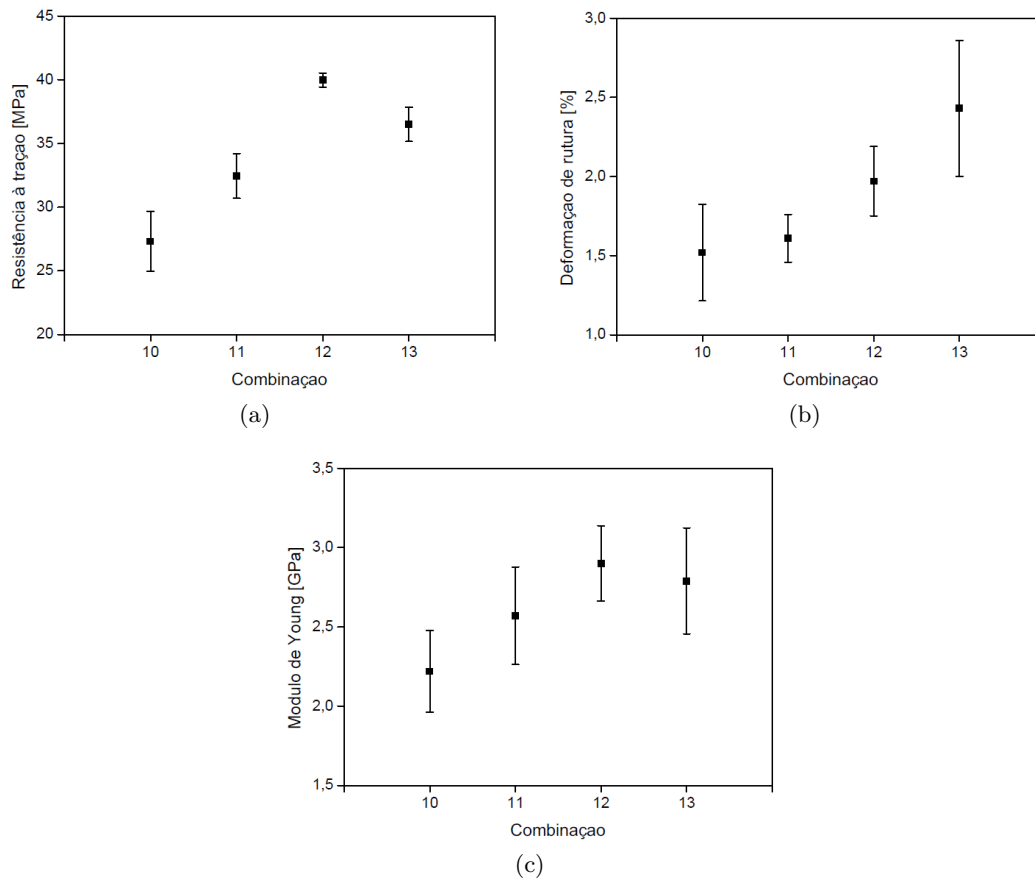


Figura 6.10: (a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young e respetivos desvios para as combinações extra.

Tal como mostra a Tabela 6.10, utilizaram-se as combinações C3, CMY e CR para analisar a espessura da camada, as combinações C9, C12 e C13 para o ângulo de preenchimento, enquanto que as combinações C1, C10 e C11 para averiguar a interferência da largura da camada nas propriedades finais. Os resultados encontram-se sintetizados na Tabela 6.11, onde é possível ter uma perceção direta da influência de cada parâmetro individualmente nas propriedades mecânicas estudadas. Nesta fase, apenas foi feito o estudo da espessura da camada, do ângulo de preenchimento e da largura da camada, uma vez que é evidente que as propriedades mecânicas melhoram com o aumento da percentagem de preenchimento.

Tabela 6.10: Combinações utilizadas na análise individual.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]
C3	0,10			
CMY	0,20	0/90	0,56	100
CR	0,30			
C9		0/90		
C12	0,30	0	0,48	20
C13		-45/45		
C1			0,40	
C10	0,10	0	0,48	20
C11			0,56	

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento
C: Largura da Camada; D: Preenchimento

Tabela 6.11: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações consideradas.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
C3	$54,15 \pm 1,25$	$3,10 \pm 0,60$	$3,53 \pm 0,45$
CMY	$47,23 \pm 0,46$	$2,38 \pm 0,83$	$3,32 \pm 0,35$
CR	$40,78 \pm 2,75$	$2,50 \pm 0,83$	$2,88 \pm 0,26$
C9	$39,68 \pm 0,61$	$2,50 \pm 0,35$	$2,64 \pm 0,56$
C12	$39,99 \pm 0,55$	$1,97 \pm 0,22$	$2,90 \pm 0,24$
C13	$36,50 \pm 1,34$	$2,43 \pm 0,43$	$2,79 \pm 0,33$
C1	$27,91 \pm 1,38$	$2,13 \pm 0,39$	$1,93 \pm 0,20$
C10	$27,32 \pm 2,36$	$1,52 \pm 0,31$	$2,22 \pm 0,26$
C11	$32,46 \pm 1,75$	$1,61 \pm 0,15$	$2,57 \pm 0,31$

Analisando os resultados obtidos para as combinações utilizadas para estudar a influência da espessura nas propriedades mecânicas, percebe-se claramente que houve uma melhoria. Em relação à resistência à tração, o aumento é significativo uma vez que se passou de $40,78 \pm 2,75$ MPa para uma resistência à tração de $54,15 \pm 1,25$ MPa com a diminuição da espessura. Avaliando os valores referentes à deformação de rutura, verifica-se que o melhor valor ($2,38 \pm 0,83$ %) foi obtido para uma espessura de 0,2 mm sendo que, com 0,1 mm de espessura a deformação de rutura aumentou ($3,10 \pm 0,60$ %). Verificando os resultados obtidos para o módulo de Young, percebe-se que uma menor espessura resulta numa melhoria desta propriedade, uma vez que o melhor valor ($3,53 \pm 0,45$ GPa) foi conseguido para uma espessura de 0,1 mm.

Relativamente à avaliação da influência do ângulo de preenchimento (combinações C9, C12 e C13), foi de igual forma evidente a interferência do ângulo de preenchimento nas propriedades mecânicas finais. A combinação C12, com um ângulo de preenchimento de 0° , permitiu obter a melhor resistência à tração, a menor deformação de rutura, e o maior módulo de Young. A resistência à tração mais fraca foi obtida para os ângulos de preenchimento de $-45^\circ/45^\circ$, consequência de não existir nenhuma camada orientada

axialmente. Comparando os valores da deformação de rutura e o módulo de elasticidade para os ângulos de preenchimento $0^\circ/90^\circ$ e $-45^\circ/45^\circ$, percebe-se que com $-45^\circ/45^\circ$ obtiveram-se as melhores propriedades mecânicas.

Os resultados das combinações C1, C10 e C11, permitem verificar a influência da largura da camada nas propriedades mecânicas finais. Comparando os valores de resistência à tração das três combinações em análise, percebe-se que o melhor valor foi obtido com uma largura de camada de 0,56 mm. Relativamente à deformação de rutura, o valor mínimo foi obtido para a combinação C10 ($1,52 \pm 0,31$ %), para uma largura de camada de 0,48 mm. Para a combinação C11 foi possível obter o maior valor para o módulo de Young das três combinações. Como as combinações C1 e C11 apenas diferem na largura da camada (0,40 e 0,56 mm, respetivamente), é expectável que a combinação C11 tenha uma maior quantidade de material que, por consequência, leve a um aumento das propriedades mecânicas.

Resumindo, com o estudo preconizado aos parâmetros de forma individual, foi possível retirar conclusões semelhantes à literatura analisada [48; 50; 56; 59]. As combinações apresentadas na Tabela 6.10, permitiram concluir que utilizando menores espessuras, ângulo de preenchimento de 0° e maiores larguras, é possível obter as melhores propriedades mecânicas. Os resultados obtidos mostraram que o método de Taguchi preliminar foi improficuo. Para perceber a razão, analisou-se detalhadamente o método de Taguchi feito. Considerou-se que o problema poderia estar relacionado com a variação da percentagem de preenchimento (20%, 60% e 100%) que por algum motivo provocou a falha do método. Tendo em conta esta observação, realizou-se novamente o método de Taguchi mas desta vez sem a variação da percentagem de preenchimento, percentagem essa que foi definida como sendo 100% (Tab. 6.12).

Tabela 6.12: Matriz do método de Taguchi revisto.

Ensaio/Param	Espessura [mm]	Â. Preenchimento [$^\circ$]	Largura [mm]
CB1	0,10	0	0,40
CB2	0,10	$-45/45$	0,48
CB3	0,10	0/90	0,56
CB4	0,20	0	0,48
CB5	0,20	$-45/45$	0,56
CB6	0,20	0/90	0,40
CB7	0,30	0	0,56
CB8	0,30	$-45/45$	0,40
CB9	0,30	0/90	0,48

6.5 Método de Taguchi revisto

Na presente secção, apresentam-se os resultados obtidos para as combinações de parâmetros indicadas na Tabela 6.12. Na Tabela 6.13 são exibidos os resultados para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young. Na Figura 6.11 são apresentados os desvios referentes a cada propriedade, de modo a oferecer uma melhor compreensão dos valores obtidos.

Tabela 6.13: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações revistas.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
CB1	$55,06 \pm 0,71$	$2,91 \pm 0,87$	$3,41 \pm 0,37$
CB2	$52,55 \pm 0,36$	$4,60 \pm 0,69$	$3,36 \pm 0,34$
CB3	$54,15 \pm 1,25$	$3,10 \pm 0,60$	$3,53 \pm 0,45$
CB4	$52,44 \pm 1,49$	$4,46 \pm 0,42$	$3,90 \pm 0,44$
CB5	$46,98 \pm 0,36$	$3,76 \pm 0,56$	$3,32 \pm 0,43$
CB6	$48,11 \pm 0,58$	$2,80 \pm 0,52$	$3,51 \pm 0,41$
CB7	$44,33 \pm 1,43$	$2,94 \pm 0,54$	$3,10 \pm 0,27$
CB8	$50,94 \pm 1,32$	$3,64 \pm 0,43$	$3,58 \pm 0,43$
CB9	$42,46 \pm 1,85$	$3,12 \pm 0,34$	$2,88 \pm 0,25$

Com a percentagem de preenchimento fixa em 100%, é possível ter uma visão mais clara da influência dos restantes parâmetros. Os valores de resistência à tração obtidos, permitem verificar a importância que a espessura da camada apresenta nesta propriedade. Existe um claro decréscimo da resistência à tração com o aumento da espessura, como é possível observar na Figura 6.11. A melhor resistência à tração foi conseguida para a combinação CB1 ($55,06 \pm 0,71$ MPa): espessura de 0,1 mm, ângulo de preenchimento de 0° e 0,4 mm de largura. Em relação ao outro extremo, a combinação CB9 foi a que obteve um pior valor para a resistência à tração ($42,46 \pm 1,85$ MPa) para uma espessura de 0,3 mm.

Analisando o gráfico da deformação de rutura (Fig. 6.11 (b)), verifica-se que o parâmetro que possui uma influência mais perceptível é o ângulo de preenchimento. As combinações CB1, CB3, CB6, CB7 e CB9 obtiveram as menores deformações de rutura, próximas de 3%. A semelhança entre estas combinações prende-se com os ângulos de preenchimento utilizados, uma vez que todos os casos apresentam um ângulo de 0° (0° ou $0^\circ/90^\circ$). A combinação CB4, apesar de apresentar um ângulo de preenchimento de 0° , apresenta uma deformação de rutura mais elevada. De um modo geral, ângulos de preenchimento de $-45^\circ/45^\circ$ aparentam obter maiores valores de deformação de rutura do que os restantes ângulos. Como já referido anteriormente, o mais convincente será devido à tendência que as camadas apresentam para ficar paralelas à força aplicada.

Relativamente ao módulo de elasticidade, a influência dos diferentes parâmetros utilizados não parece ser significativa, comparando com a resistência à tração e a deformação de rutura. O valor do módulo de Young obtido para as diferentes combinações é aproximadamente 3,45 GPa, com exceção das combinações CB4 e CB9. Para a primeira, verificou-se um módulo de elasticidade de $3,90 \pm 0,44$ GPa, para uma espessura da camada de 0,2 mm, um ângulo de preenchimento de 0° e uma largura de 0,48 mm, enquanto que para a combinação CB9, com 0,3 mm de espessura da camada, ângulos de preenchimento de $0^\circ/90^\circ$ e 0,48 mm de largura da camada, obteve-se um módulo de Young de $2,88 \pm 0,25$ GPa.

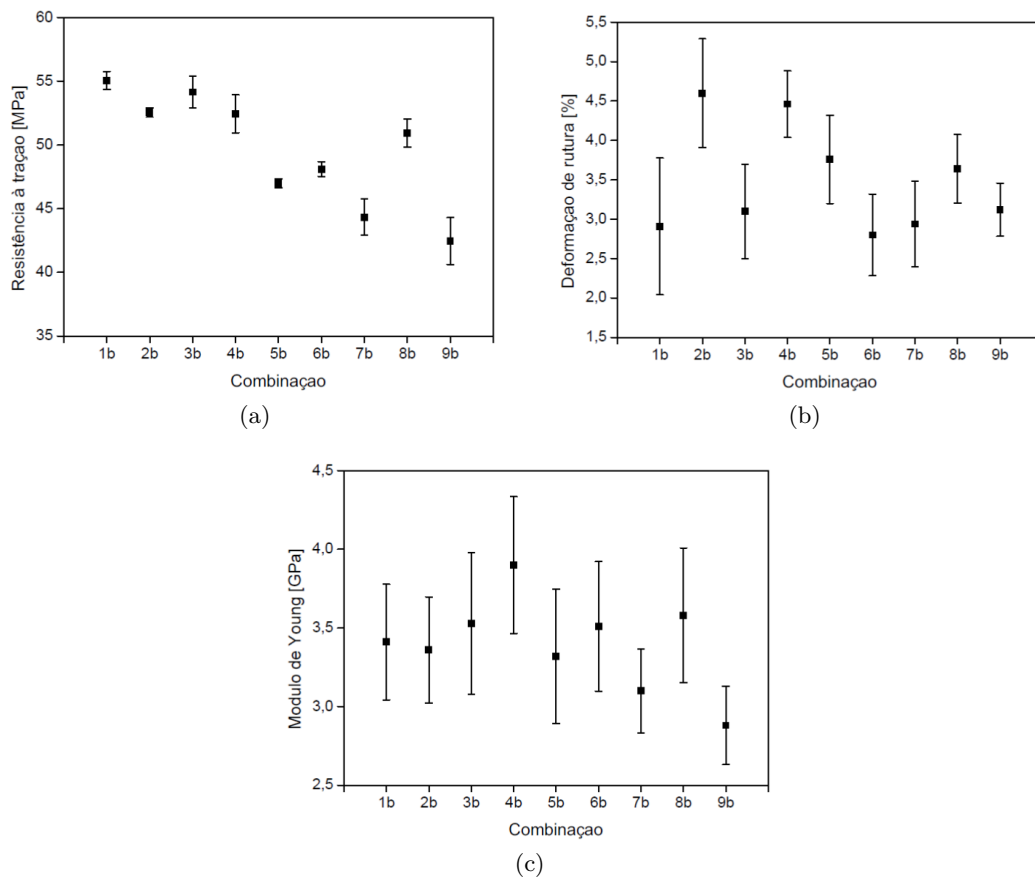


Figura 6.11: (a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young e respectivos desvios, para as combinações revistas.

6.5.1 Resistência à Tração

Na Figura 6.12 estão representados os gráficos da resistência à tração em função dos parâmetros estudados. Comparando os valores da figura com os resultados obtidos experimentalmente conclui-se que estes estão em concordância, ao contrário do sucedido na primeira iteração do método de Taguchi. Neste caso, percebe-se que quanto menores as espessuras, melhores valores de resistência à tração. Tanto o ângulo de preenchimento, como a largura da camada parecem não ter uma influência significativa, apesar dos melhores valores terem sido obtidos com 0° e 0,40 mm, respetivamente. Na Tabela 6.14 está apresentada a combinação CBR, que otimiza os valores de resistência à tração.

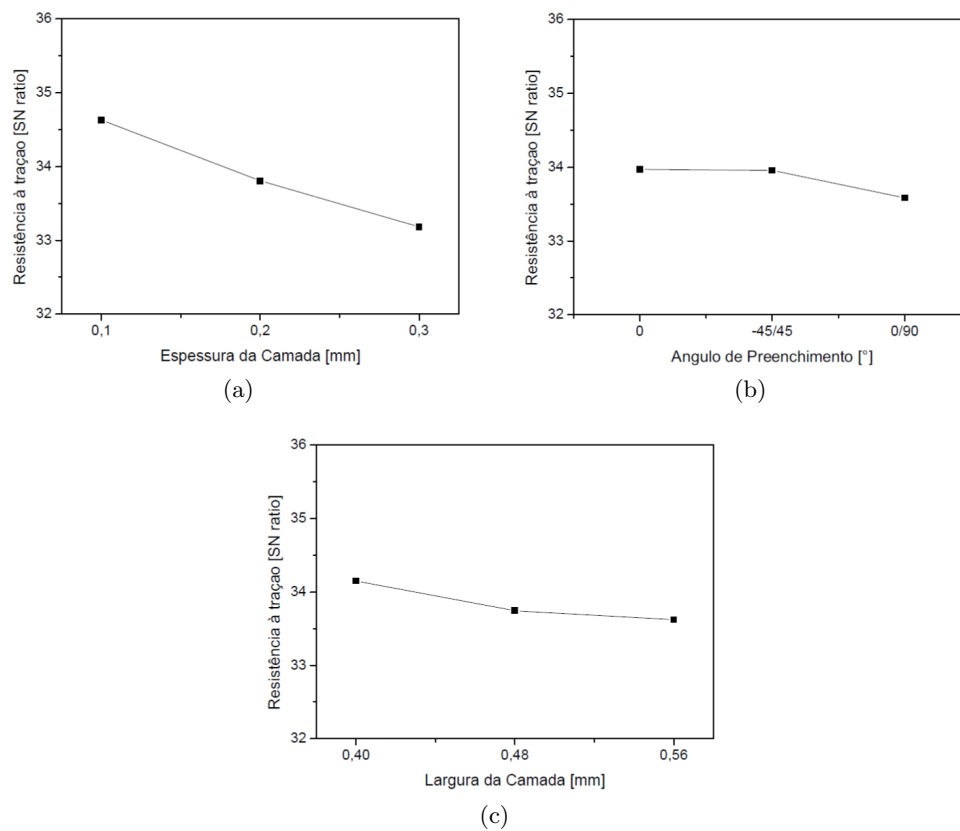


Figura 6.12: Resistência à tração: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada.

Tabela 6.14: Parâmetros ideais – Resistência à tração (CBR).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,1
Ângulo de Preenchimento [°]	0
Largura da Camada [mm]	0,4
Preenchimento [%]	100

6.5.2 Deformação de Rutura

Na Figura 6.13 estão representados os gráficos de deformação de rutura em função da (a) espessura da camada, (b) ângulo de preenchimento e (c) largura da camada. Dos três parâmetros analisados, a espessura da camada aparenta ser o parâmetro com menor influência na deformação de rutura. Ângulos de preenchimento de $-45^\circ/45^\circ$ dão origem a maiores deformações, enquanto que analisando a largura da camada, se conclui que com 0,48 mm se conseguem os piores valores de deformação de rutura. Teoricamente, uma espessura de 0,3 mm, ângulos de preenchimento de $0^\circ/90^\circ$ e uma largura de 0,4 mm, permitem obter os melhores valores de deformação de rutura (combinação CBD, Tab. 6.15).

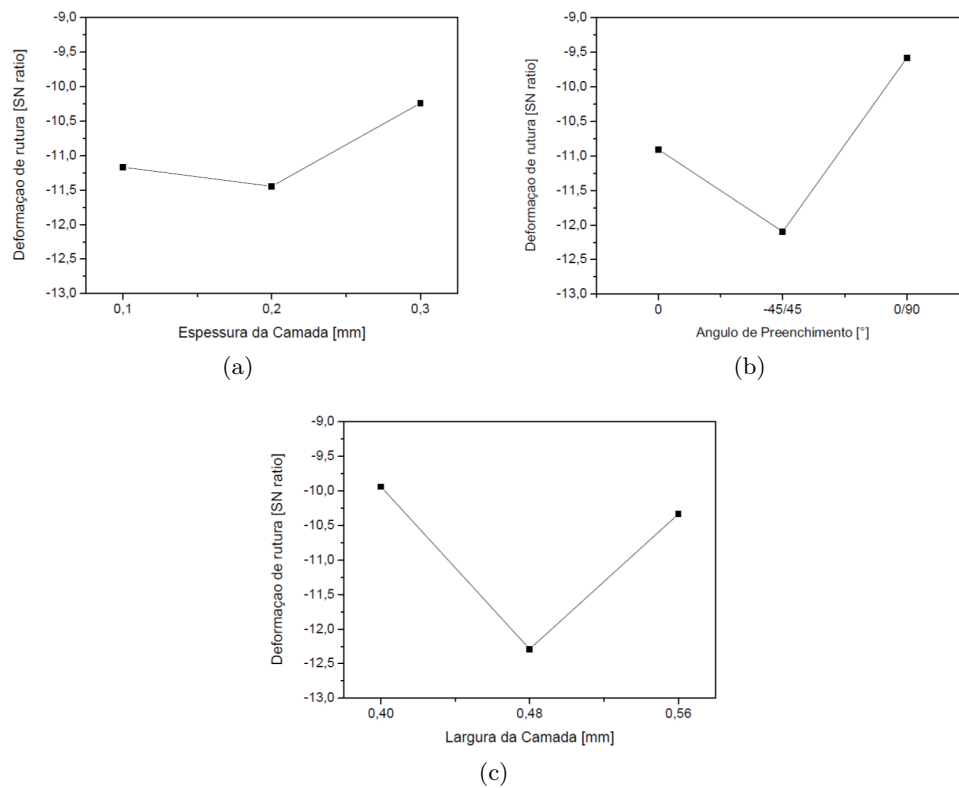


Figura 6.13: Deformação de rutura: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada.

Tabela 6.15: Parâmetros ideais – Deformação de rutura (CBD).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,3
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,4
Preenchimento [%]	100

6.5.3 Módulo de Young

Na Figura 6.14 estão representados os gráficos do módulo de Young em função dos parâmetros estudados. Como se verificou para os resultados experimentais, o módulo de Young é idêntico para a maioria das combinações, sendo a espessura da camada o parâmetro com maior interferência na propriedade. Apesar do ângulo de 0° ser considerado o ângulo preferencial, a diferença entre os ângulos de preenchimento $-45^\circ/45^\circ$ é mínima. Referente à largura da camada verifica-se igualmente uma pequena variação, sendo que quanto menor for a largura da camada maior é o módulo de Young. Na Tabela 6.16 está apresentada a combinação CBMY, que otimiza os valores de módulo de Young.

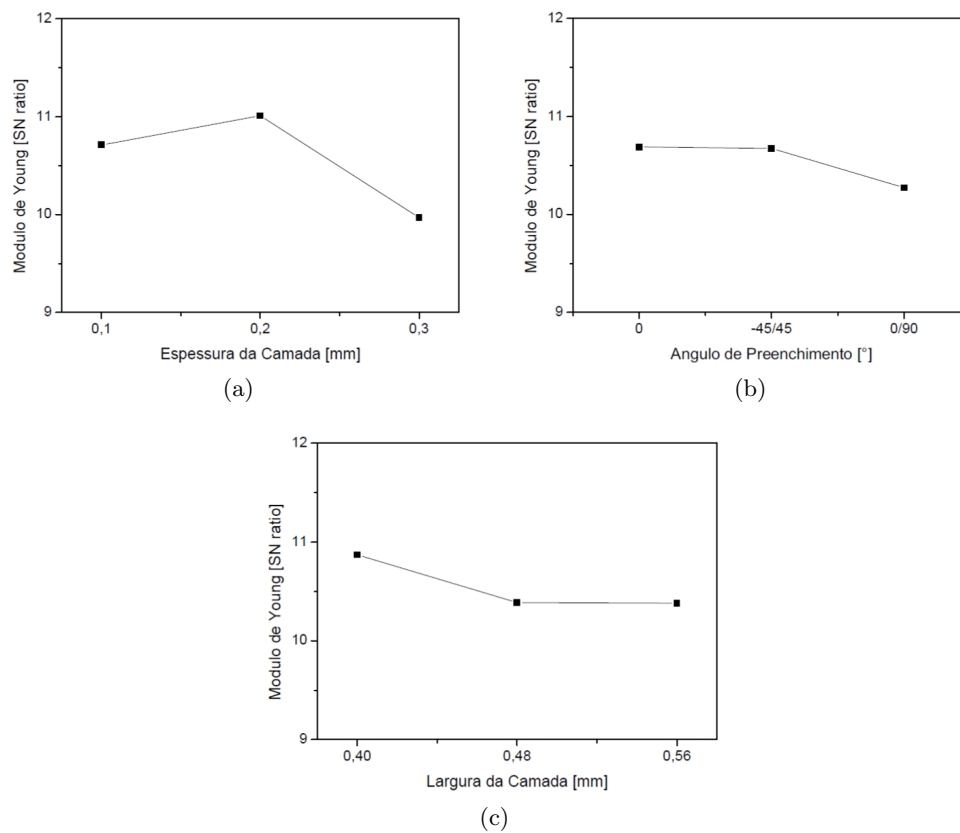


Figura 6.14: Módulo de Young: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada.

Tabela 6.16: Parâmetros ideais – Módulo de Young (CBMY).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,2
Ângulo de Preenchimento [°]	0
Largura da Camada [mm]	0,4
Preenchimento [%]	100

Na Tabela 6.17 são apresentados os valores para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para as combinações consideradas como ideais para obter as melhores propriedades mecânicas. Teoricamente, os arranjos de parâmetros indicados nas Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16 são os adequados para conseguir os melhores valores de resistência à tração (CBR), deformação de rutura (CBD) e módulo de Young (CBMY), respetivamente. Analisando os resultados, verifica-se que de um modo geral, as propriedades mecânicas obtidas foram de facto as melhores.

Tabela 6.17: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young – Combinações revistas ótimas.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
CBR	$55,06 \pm 0,71$	$2,91 \pm 0,87$	$3,41 \pm 0,37$
CBD	$42,97 \pm 1,99$	$2,71 \pm 0,41$	$3,48 \pm 0,29$
CBMY	$47,49 \pm 1,39$	$2,17 \pm 0,37$	$3,58 \pm 0,39$

A combinação CBR permite obter, na prática, o melhor valor de resistência à tração ($55,06 \pm 0,71$ MPa), aferindo desta forma a escolha correta dos parâmetros obtidos através da Figura 6.12. Ao contrário do que se verificou na análise da primeira iteração método de Taguchi, os resultados obtidos estão de acordo com as conclusões retiradas da literatura. Existe uma conformidade entre os resultados obtidos no presente estudo e as conclusões retiradas por B.M. Tymrak *et al.*, entre outros [48; 49; 50]. C. Ziemian *et al.* [61] verificaram que utilizando um ângulo de preenchimento de 0° obtinham um valor superior de resistência à tração, tal como se observou nos resultados da Tabela 6.17. G.C. Onwubolu *et al.* [50] também concluíram que a resistência à tração aumenta com a diminuição da largura da camada. Comparando a deformação de rutura da combinação CBD com os resultados da Tabela 6.13, observa-se que o valor obtida é de facto o melhor. No entanto, a deformação de rutura conseguida com a combinação CBMY obteve uma deformação de $2,17 \pm 0,37$ %, concluindo que existe a possibilidade de existir combinações que permitem obter melhores valores de deformação de rutura apesar da combinação considerada ideal ser a combinação CBD. Avaliando o módulo de Young obtido na combinação CBMY ($3,58 \pm 0,39$ GPa) e os restantes valores, percebe-se que a combinação CB4 permitiu obter um valor superior do módulo de elasticidade ($3,90 \pm 0,44$ GPa). O único parâmetro que difere em ambas as combinações, é a largura da camada que apresenta um valor de 0,4 mm na combinação CBMY e 0,48 mm na combinação CB4. Esta comparação indica que o módulo de Young aumenta consoante o aumento da largura, contrariando, de certa forma, o gráfico da Figura 6.14.

De um modo geral, conclui-se que os resultados obtidos na segunda iteração do método de Taguchi estão em concordância com a maioria dos estudos realizados por outros autores. Apesar dos arranjos de parâmetros teoricamente ideais apresentarem valores satisfatórios, observou-se que ainda existem algumas lacunas uma vez que se conseguiram melhores valores com diferentes combinações, como é o caso da deformação de rutura para as combinações CBD e CBMY.

6.6 Análise Geral

Após as três análises efetuadas, é possível fazer uma comparação entre as mesmas. Na Tabela 6.18 mostram-se, de forma resumida, os parâmetros obtidos como sendo teoricamente ideais, para a primeira iteração do método de Taguchi (1º Taguchi), para a análise individual às combinações extras (C. Individual) e para a segunda iteração do método de Taguchi (2º Taguchi).

Tabela 6.18: Comparação geral das análises.

Variável ideal	1º Taguchi	C. Individual	2º Taguchi
Espessura da Camada [mm]	0,3	0,1	0,1
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90	0	0
Largura da Camada [mm]	0,56	0,56	0,4
Preenchimento [%]	100	20/100	100

Analisando a Tabela 6.18, percebe-se que as conclusões retiradas com a análise individual para as combinações extra estão em concordância com as conclusões da segunda iteração do método de Taguchi, exceto para a largura da camada. Com o objetivo de encontrar a razão desta circunstância, foi feita uma análise detalhada de todos os arranjos de parâmetros utilizados em ambas as análises. Verificou-se que o único aspecto distinto nos estudos da largura da camada era a percentagem de preenchimento utilizada. Enquanto que nas combinações extras impressas para avaliar a influência da largura se utilizou um preenchimento de 20%, nas combinações da segunda iteração do método de Taguchi a percentagem de preenchimento foi de 100%. Com isto percebeu-se a influência do preenchimento nos restantes parâmetros. Para comprovar a veracidade desta afirmação, decidiu-se fazer um estudo à fração volúmica real de combinações com diferentes larguras e com preenchimentos de 20% e 100%. Analisaram-se as combinações C1, C11, CB1 e a combinação CL, que foi impressa apenas para a análise em causa. A massa de cada provete encontra-se na Tabela 6.19.

Tabela 6.19: Fração volúmica real – Análise da largura.

Variável	Comb C1	Comb C11	Comb CB1	Comb CL
Espessura da Camada [mm]	0,10	0,10	0,10	0,10
Ângulo de Preenchimento [°]	0	0	0	0
Largura da Camada [mm]	0,4	0,56	0,4	0,56
Preenchimento [%]	20	20	100	100
Massa [g]	0,792	0,919	1,555	1,624
Diferença [g]	0,127		0,069	

Analisando as massas determinadas e as diferenças obtidas referentes às combinações apresentadas na Tabela 6.19, verifica-se que a diferença de massas nos provetes com 20% de preenchimento é superior à diferença verificada com um preenchimento de 100%. Teoricamente, peças com um preenchimento de 100% são completamente densas, daí as combinações CB1 e CL apresentarem massas semelhantes. Com o propósito de perceber

a distribuição das camadas no interior dos provetes, utilizou-se o Simplify3D para simular a impressão das quatro combinações (combinações C1, C11, CB1 e CL).

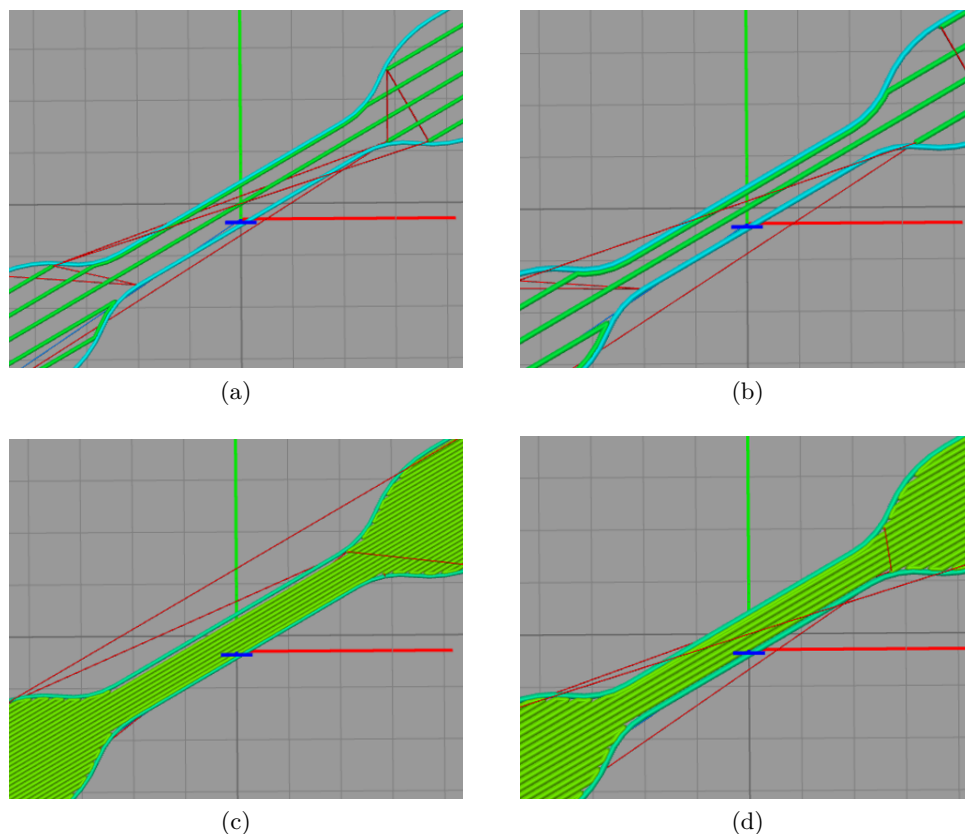


Figura 6.15: Distribuição das camadas interiores – Largura: (a) Combinação C1 (0,4 mm), (b) Combinação C11 (0,56 mm), (c) Combinação CB1 (0,4 mm), (d) Combinação CL (0,56 mm).

Na Figura 6.15 é apresentada a distribuição das camadas interiores dos provetes para diferentes tipos de larguras. Analisando a figura, verifica-se que a razão pela qual a percentagem de preenchimento interfere nos níveis ideais dos restantes parâmetros é a alteração que esta tem no número de filamentos depositados. Para baixas percentagens de preenchimento, verifica-se que maiores larguras originam melhores resistências à tração uma vez que a influência da massa se sobrepõe à influência da largura em si. Por outro lado, para percentagens superiores, quanto menor for a largura da camada maior será a resistência à tração uma vez que larguras menores permitem um maior número de deposições. O mesmo efeito é possível de observar com a espessura da camada.

Assim, verifica-se que a primeira iteração do método de Taguchi não apresenta nenhuma anomalia. Como o método teve em conta combinações com preenchimento de 20%, 60% e 100%, as conclusões retiradas podem ser consideradas para percentagens de preenchimento menores, uma vez que apenas três combinações utilizaram um preenchimento de 100%. De certa forma, é possível afirmar que os artigos analisados na literatura apenas se enquadram para percentagens próximas de 100%. Vários autores

[49; 50; 63], concluíram que com menores valores de espessura da camada se obtinha os melhores valores de resistência à tração. Em relação às conclusões retiradas acerca da largura da camada, Onwubolu *et al.* [50] concluíram que a melhor resistência à tração se obtinha com menores valores de largura da camada.

6.7 Comparação das Propriedades Mecânicas Obtidas (Injeção/FFF)

Para ter uma percepção mais clara das propriedades mecânicas obtidas com os estudos efetuados aos provetes impressos, foi feita uma comparação para provetes, mas obtidos por injeção [77]. Os valores da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade para os provetes injetados estão apresentados na Tabela 6.20.

Tabela 6.20: Resistência à tração, Deformação de rutura e Módulo de Young – Provetes injetados.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
PLA	$60,71 \pm 3,00$	$2,52 \pm 0,23$	$3,88 \pm 0,25$

Considerando todas as combinações impressas, verifica-se que o valor de resistência à tração mais próximo foi obtido para a combinação CBR ($55,06 \pm 0,71$ MPa), para a deformação de rutura, utilizando 100% de preenchimento, foi conseguida para a combinação CBMY ($2,17 \pm 0,37$ %), enquanto que para a combinação CB4 foi obtido o valor para o módulo de elasticidade mais próximo ($3,90 \pm 0,44$ GPa). Na Tabela 6.21, mostra-se a comparação das propriedades obtidas através da tecnologia FFF com os provetes produzidos por injeção.

Tabela 6.21: Resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young – FFF vs Injeção.

Combinação	σ_b [MPa]	ε_b [%]	E [GPa]
PLA	$60,71 \pm 3,00$	$2,52 \pm 0,23$	$3,88 \pm 0,25$
CBR	$55,06 \pm 0,71$	–	–
CBMY	–	$2,17 \pm 0,37$	–
CB4	–	–	$3,90 \pm 0,44$
Variação [%]	-9,31	13,89	0,52

Como seria expectável, os provetes produzidos por FFF apresentam um decréscimo do valor para a resistência à tração em 9,31% comparando com a resistência à tração obtida para os provetes obtidos por injeção. A deformação de rutura melhorou, enquanto que o módulo de elasticidade se preservou.

6.8 Percentagem de Preenchimento Real

Como seria de esperar, a utilização das camadas envolventes altera a fração volúmica dos provetes, *i.e.*, a fração volúmica real dos provetes deixa de ser igual à percentagem de preenchimento utilizada, uma vez que tanto o perímetro como as camadas acrescentadas aumentam a percentagem volúmica final. Para avaliar a influência destas camadas na percentagem de preenchimento real do provete, os provetes mostrados na Figura 5.12 e os provetes referentes às combinações da primeira iteração do método de Taguchi apresentadas na Tabela 6.2, foram pesados. O perímetro foi também impresso individualmente para analisar a percentagem de massa que acrescenta ao resultado final. Através das Equações 6.1 e 6.2, a percentagem de preenchimento de cada provete foi calculada, estando os valores apresentados nas Tabelas 6.22 e 6.23.

$$i_{\text{real}} = f_{\text{vreal}} - \left(\frac{e_{\text{sup}} + e_{\text{inf}}}{e_{\text{total}}} \times 100 \right) \times \left(\frac{e_{\text{total}}}{e_{\text{total}} - (e_{\text{sup}} + e_{\text{inf}})} \right) - P \quad (6.1)$$

- f_{vreal} é a fração volúmica real do provete, em %;
- i é a percentagem de preenchimento utilizada;
- P é a % associada ao perímetro (=11,96% quando perímetro 1);
- e é a soma das espessuras das camadas;
- sup, inf e total são os índices correspondentes a superior, inferior e total, respetivamente.

$$f_{\text{vreal}} = \frac{m \times 100}{m_{\text{inj}}} \quad (6.2)$$

- m é a massa do provete impresso, em gramas;
- m_{inj} é a massa do provete injetado, em gramas (=1,614 g).

Tabela 6.22: Percentagem de preenchimento real dos provetes da Figura 5.12.

	Ângulo de Preenchimento		
	0°	45°	90°
Massa [g]	0,475	0,556	0,551
f_{vreal} [%]	29,45	34,47	34,12
i [%]	20	20	20
i_{real} [%]	17,49	22,51	22,16
Diferença	-2,51	2,51	2,16

Tabela 6.23: Percentagem de preenchimento real das combinações da Tabela 5.2.

	Combinações								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Massa [g]	0,792	1,246	1,593	1,508	1,033	1,243	1,402	1,604	1,161
$f_{vreal}[\%]$	49,04	77,17	98,67	93,40	63,99	77,03	86,88	99,38	71,94
$i [\%]$	20	60	100	100	20	60	60	100	20
$i_{real} [\%]$	15,24	55,43	86,14	76,04	22,56	46,28	57,42	86,60	22,57
Diferença	-4,76	-4,57	-13,86	-23,96	2,56	-13,72	-2,58	-13,40	2,57

Observando os valores apresentados na Tabela 6.22, percebe-se que o ângulo de preenchimento influencia a percentagem de preenchimento real, uma vez que os provetes com ângulo de 45° e 90° apresentam uma maior quantidade de material em relação ao provete com ângulo de preenchimento 0° . A diferença entre a percentagem de preenchimento real e o valor de preenchimento (parâmetro) inserido no Simplify3D é reduzida, o que é uma consequência dos provetes analisados não apresentarem camadas envoltivas. Em relação aos resultados apresentados na Tabela 6.23, os desvios calculados são elevados e dispares, obtendo-se variações desde 2,56% (combinação C5) até 23,96% (combinação C4). À exceção do resultado referente às combinações C4 e C9, as maiores diferenças são obtidas para ângulos de preenchimento de $0^\circ/90^\circ$, como é perceptível nos dados das combinações C3, C6.

Analisando de forma geral os resultados obtidos, são várias as causas que influenciam a percentagem de preenchimento real, tais como:

- **Ângulo de Preenchimento:** Como foi possível verificar, a quantidade de material depositada com ângulos de preenchimento de $-45^\circ/45^\circ$ ou $0^\circ/90^\circ$ é superior à quantidade de material para um ângulo de preenchimento de 0° ;
- **Largura da camada:** A Equação 6.1 apenas tem em conta as espessuras das camadas, não considerando as larguras das camadas depositadas. Recorrendo-se a larguras superiores obtém-se maiores preenchimentos, aspeto que não é tido em conta na equação;
- **Espessuras reais:** Apesar da espessura da camada ser inserida no software, na prática a camada poderá ter uma pequena variação de espessura. A temperatura de extrusão pode ser uma das razões que conduza a este efeito uma vez que interfere na fluidez do material depositado;
- **Precisão do equipamento:** Como se verificou na revisão da literatura, dependendo do equipamento, 100% de preenchimento pode não significar que a peça esteja completamente densa, levando a concluir que a percentagem de preenchimento real seja menor do que 100%.

6.9 Modelos de Previsão

Na presente secção pretendem-se apresentar os resultados obtidos por modelos de previsão como a lei das misturas, os métodos analíticos utilizados para materiais celulares e resultados alcançados na utilização de redes neuronais artificiais.

6.9.1 Lei das Misturas

A Tabela 6.24 indica as frações volúmicas obtidas de cada combinação, sendo a combinação PLA alusiva aos provetes obtidos por injeção. As massas reais das combinações C7, C8 e C9 são 1,4485 gramas, 1,660 gramas e 1,1995 gramas, respetivamente, enquanto que o volume real é de 1,345 cm³, valor esse obtido através do modelo CAD do provete. As massas referentes a estas combinações (Tab. 6.24) foram obtidas através das Equações 5.5 e 5.6.

Tabela 6.24: Fração volúmica das combinações do método de Taguchi preliminar.

Combinações	Volume [cm ³]	Massa [g]	fv_{PLA}	fv_{ar}
PLA		1,6140	1	0
C1		0,7915	0,4904	0,5096
C2		1,2455	0,7717	0,2283
C3		1,5925	0,9867	0,0133
C4	1,3016	1,5075	0,9340	0,0660
C5		1,0328	0,6399	0,3601
C6		1,2433	0,7703	0,2297
C7		1,4022*	0,8688	0,1312
C8		1,6042*	0,9938	0,0062
C9		1,1612*	0,7194	0,2806

* massa para um volume de 1,3016 cm³

Utilizando a Equação 4.1, os valores apresentados na Tabela 6.24 e o módulo de Young do PLA injetado (3,88 GPa), obtiveram-se os valores para o módulo de Young que estão apresentados na Tabela 6.25. As Figuras 6.16 e 6.17 ajudam na visualização dos resultados obtidos.

Tabela 6.25: Comparação entre os valores previstos pela lei das misturas e os obtidos.

	Combinações								
Módulo de Young [GPa]	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Modelo de Voigt	1,90	2,99	3,83	3,62	2,48	2,99	3,37	3,86	2,79
Modelo de Reuss	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅
Obtido	1,93	2,59	3,53	3,90	2,55	3,51	3,45	3,58	2,64

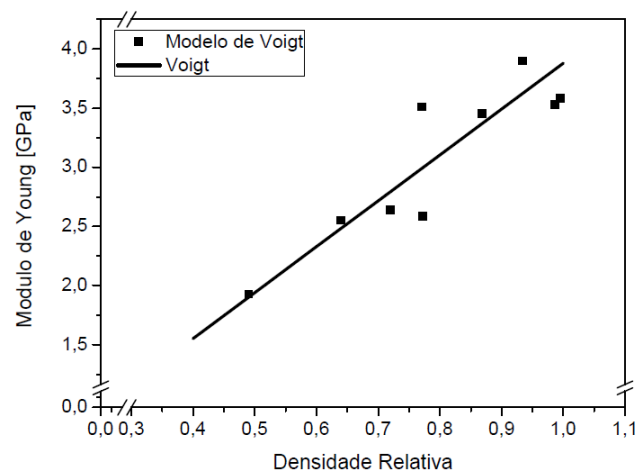


Figura 6.16: Dispersão dos valores para o módulo de Young obtidos através da aplicação do Modelo de Voigt.

Analisando os gráficos das Figuras 6.16 e 6.17, percebe-se que os resultados obtidos experimentalmente encontram-se próximos dos resultados obtidos através da Lei das Misturas. As combinações C1, C5 e C7 são as que apresentam valores mais semelhantes encontrando-se praticamente sobre o limite de Voigt. A combinação C6 foi a combinação com maior discrepância, obtendo uma diferença de 0,52 GPa em relação ao valor obtido com a Equação 4.1. Os valores obtidos pelas combinações C4 e C6 são superiores ao limite máximo do modelo. Uma possível causa para o ocorrido é o intervalo utilizado para calcular o módulo de elasticidade, durante o ensaio, ser bastante pequeno (entre 0,0005 e 0,0025 MPa). Como referido na norma, o tipo de provete utilizado no presente estudo não é o mais adequado quando se pretende calcular o módulo de Young. Contudo, de uma forma global, os resultados obtidos são bastante idênticos.

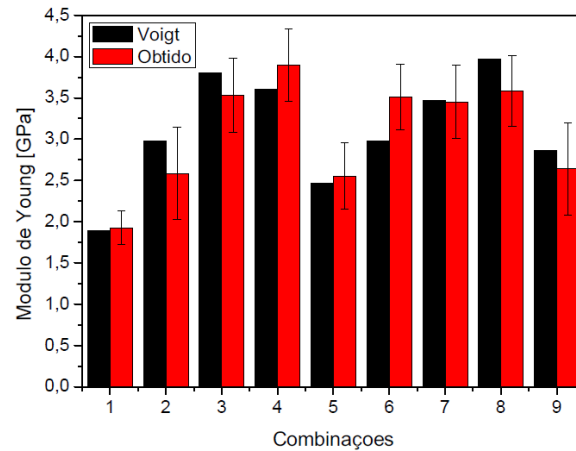


Figura 6.17: Comparação dos valores de módulo de Young obtidos e os previstos, através do Modelo de Voigt.

6.9.2 Modelos de Previsão para Materiais Celulares

As densidades e densidades relativas de cada combinação estão apresentadas na Tabela 6.26. Como módulo de elasticidade do material utilizado, considerou-se o módulo de Young obtido através da análise feita aos provetes injetados (3,88 GPa).

Tabela 6.26: Densidades das combinações do método de Taguchi preliminar.

Combinações	Volume [cm ³]	Massa [g]	ρ [g/cm ³]	ρ_{rel}
PLA		1,6140	1,24	1
C1	1,3016	0,7915	0,6081	0,4904
C2		1,2455	0,9569	0,7717
C3		1,5925	1,2235	0,9867
C4		1,5075	1,1582	0,9340
C5		1,0328	0,7934	0,6399
C6		1,2433	0,9552	0,7703
C7		1,4022*	1,0770	0,8685
C8		1,6042*	1,2348	0,9958
C9		1,1612*	0,8918	0,7192

Com os modelos criados por Gibson e Ashby (G&A), Simone e Gibson (S&G) e Rens e Ehrenstein (R&E), calcularam-se os módulos de Young teóricos e compararam-se com os valores obtidos experimentalmente. Na Tabela 6.27 são comparados os valores calculados e os experimentais. Nas Figuras 6.18 e 6.19 estão representados graficamente os resultados apresentados na Tabela 6.27, para uma melhor percepção.

Analizando os resultados experimentais e comparando-os com os dos modelos de previsão para materiais celulares, percebe-se facilmente que nenhum destes modelos analíticos se enquadra satisfatoriamente. O modelo que mais se aproxima dos resultados experimentais é o modelo mais generalista (Gibson e Ashby).

Tabela 6.27: Comparação entre os valores teóricos dos modelos de materiais celulares e os obtidos.

	Combinações								
Módulo de Young [GPa]	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Modelo de G&A	0,93	2,31	3,78	3,39	1,59	2,30	2,93	3,85	2,01
Modelo de R&E	0,63	0,99	1,26	1,20	0,82	0,99	1,11	1,28	0,92
Modelo de S&G	0,90	1,69	2,42	2,23	1,29	1,68	2,00	2,45	1,52
Obtido	1,93	2,59	3,53	3,90	2,55	3,51	3,45	3,58	2,64

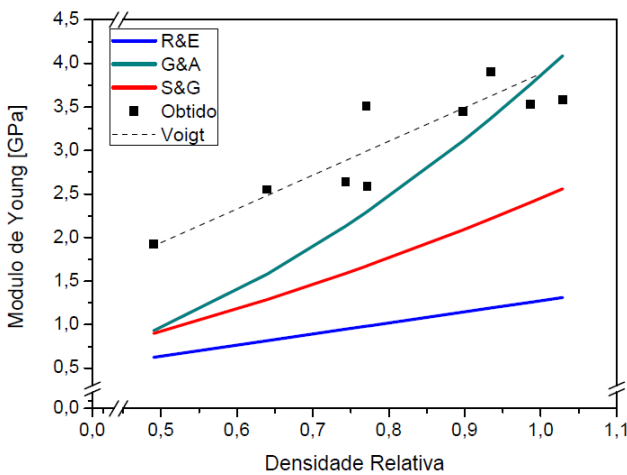


Figura 6.18: Dispersão dos valores para o módulo de Young obtidos através da aplicação dos modelos de materiais celulares.

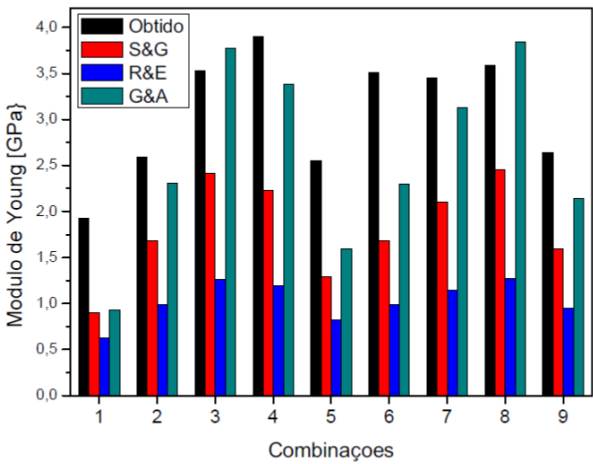


Figura 6.19: Comparação dos valores de módulo de Young obtidos e os previstos, através dos modelos de materiais celulares.

6.9.3 Redes Neuronais Artificiais

Com os valores previstos pelos modelos analíticos estudados (Fig. 6.16 e Fig. 6.18), foi possível concluir que nenhum dos modelos analíticos analisados se enquadra de forma precisa na previsão correta das propriedades mecânicas finais das peças impressas por FFF. Assim, optou-se por utilizar redes neuronais artificiais com o objetivo de conseguir previsões mais coerentes. Estando a rede neuronal treinada, é possível analisar os gráficos representados nas Figuras 6.20 e 6.21 que permitem validar o desempenho da rede.

Os gráficos de regressão, apresentados na Figura 6.20, mostram os *outputs* obtidos em relação ao treino, validação e teste. A linha de 45 graus serve para ter uma percepção dos resultados obtidos, sendo que uma sobreposição dos dados significa que os resultados da rede são iguais aos alvos pretendidos. É correto considerar que o ajuste é bom para todas as amostras quando R apresenta valores iguais ou superiores a 0,93, sendo R o coeficiente de correlação podendo variar entre -1 (correlação perfeita inversa) e 1 (correlação perfeita) [79]. Analisando os gráficos, percebe-se que o valor de R é superior a 0,99 para todos os casos, encontrando-se a maior parte dos resultados sobrepostos à linha. Se fossem necessários resultados mais precisos, o que não é o caso, seria possível treinar novamente a rede.

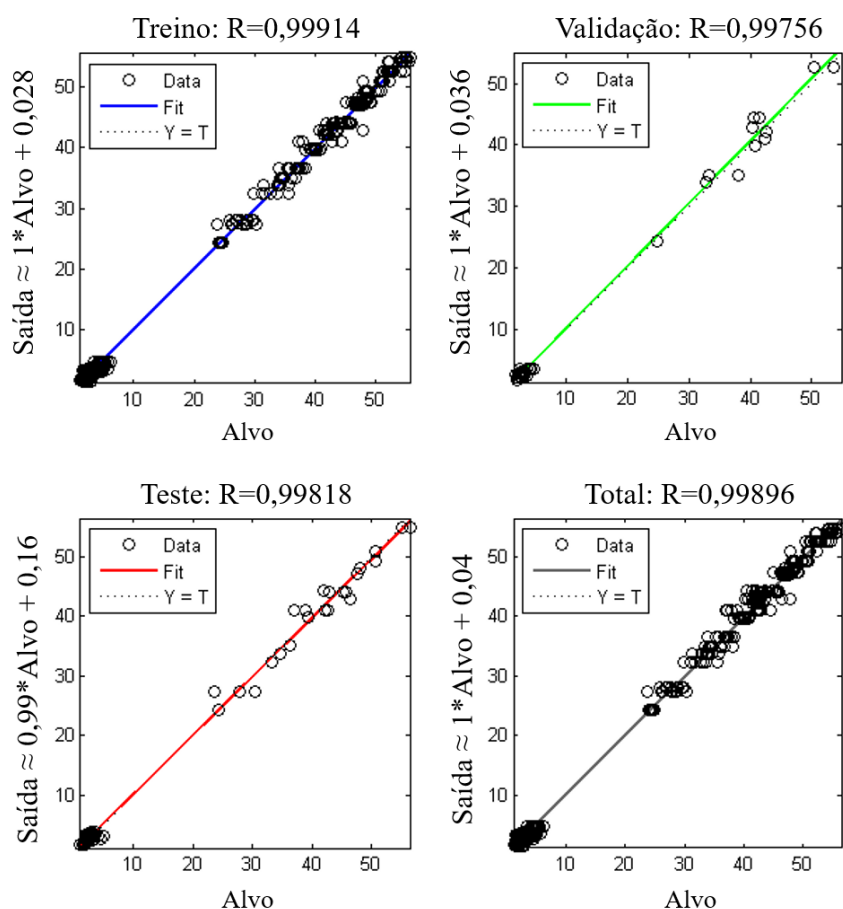


Figura 6.20: Gráficos de regressão.

O histograma de erro apresentado na Figura 6.21, tem como principal objetivo perceber se existem resultados fornecidos à rede que não se enquadram com a maioria. As barras azuis, verdes e vermelhas são referentes a dados utilizados no treino, validação e teste respectivamente. No presente caso, percebe-se que a maior parte dos dados encontra-se perto da zona onde o erro é nulo confirmando, de certa forma, os valores obtidos nos gráficos de regressão apresentados na Figura 6.20. Os dados com maior erro devem-se a um maior desvio ocorrido nos ensaios de tração.

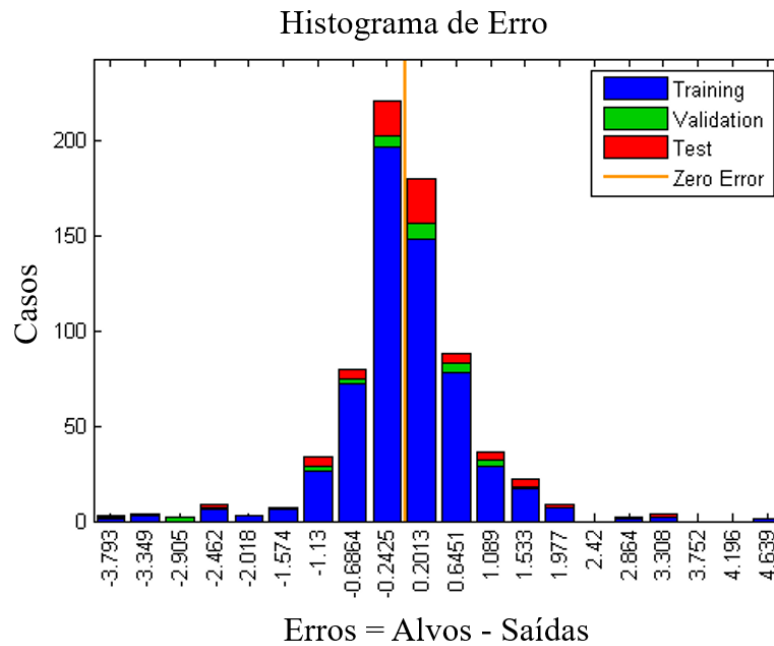
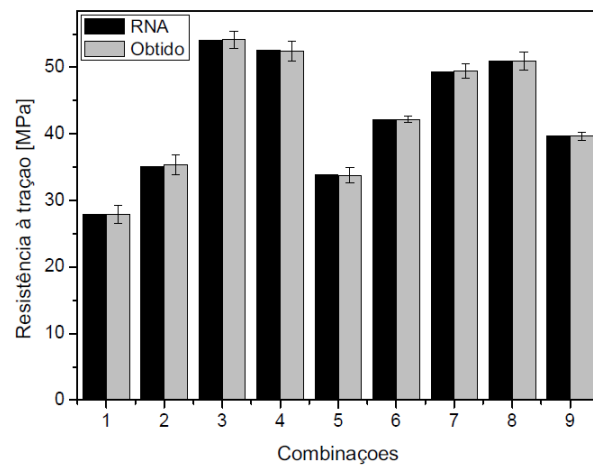


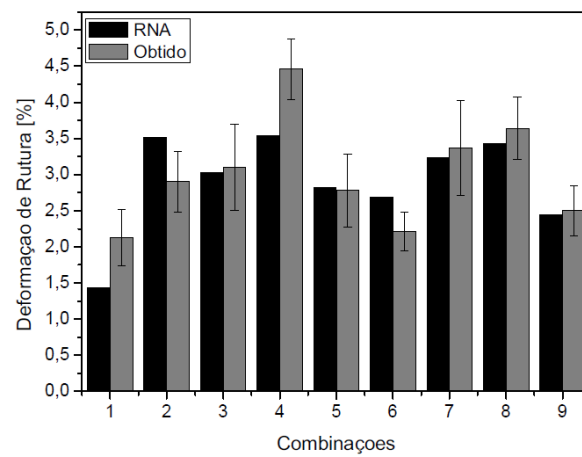
Figura 6.21: Histograma de erro.

Após o treino da rede neuronal, passou-se à utilização da mesma de modo a comparar diretamente com os resultados obtidos nos ensaios experimentais. A Figura 6.22 apresenta a comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos pela RNA, para as propriedades mecânicas estudadas. Fazendo uma comparação entre os valores de resistência à tração previstos pela rede e os resultados dos ensaios experimentais (Tab. 6.3), percebe-se que as diferenças são praticamente nulas. Em relação à deformação de rutura e do módulo de Young, as previsões apresentam algumas diferenças, uma vez que foram as propriedades que, experimentalmente, apresentaram os maiores desvios padrão.

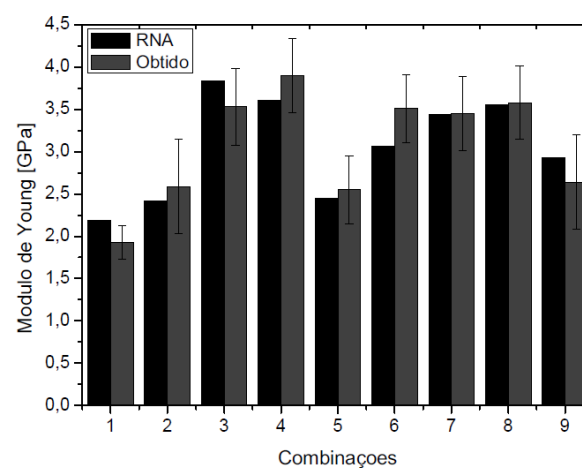
Assim, é possível concluir que os resultados obtidos através da rede neuronal criada encontram-se dentro do esperado. De forma a tornar a rede mais precisa em todos os aspetos, inclusive em combinações não utilizadas, seria necessário a impressão de um maior número de combinações. No entanto, consegue-se constatar que a utilização de redes neuronais para este fim pode ser um método viável visto não existir nenhum método analítico capaz de prever as propriedades finais de forma eficiente.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.22: Comparação dos valores obtidos experimentalmente e os previstos através da RNA: (a) Resistência à tração, (b) Deformação de rutura, (c) Módulo de Young.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Comentários Finais

Avaliando o presente trabalho, é possível concluir que os objetivos foram completamente cumpridos. Analisaram-se parâmetros como a orientação de impressão, espessura e largura da camada, ângulo de preenchimento e percentagem de preenchimento. Os resultados obtidos de cada propriedade mecânica dos provetes impressos foram comparadas com as propriedades mecânicas de provetes obtidos por injeção, para uma melhor percepção de resultados. Como foram adicionadas camadas envoltivas nos provetes impressos, foi também calculada a percentagem de preenchimento real de cada provete. Relativamente à previsão das propriedades mecânicas dos provetes, estudaram-se vários modelos de previsão.

Com o estudo da orientação, percebeu-se que os provetes impressos com uma orientação de 60° obtiveram as melhores propriedades mecânicas, com o equipamento utilizado (BETHEFIRST+). No entanto, foi utilizado uma orientação de 30° por apresentar os desvios padrões inferiores.

Após a análise efetuada aos parâmetros estudados, verificou-se que não é correto afirmar que existe um nível ideal de cada parâmetro. Em relação à espessura e largura da camada, retiraram-se diferentes conclusões consoante a percentagem de preenchimento utilizada. Para percentagens de preenchimento menores, os valores de espessura e largura da camada que obtiveram a melhor resistência à tração foram 0,3 mm e 0,56 mm, respetivamente. Por outro lado, com um preenchimento de 100%, 0,1 mm de espessura da camada e 0,4 mm de largura da camada foram os valores que conseguiram os melhores valores de resistência à tração. Tendo em conta o ângulo de preenchimento, os melhores valores foram obtidos com um ângulo de 0° uma vez que as camadas depositadas encontram-se diretamente tracionadas. No entanto, para peças mais complexas, é preferível utilizar ângulos alternados visto que existe uma maior probabilidade das peças sofrerem solicitações com diferentes orientações.

Relativamente à percentagem de preenchimento, teoricamente para maiores preenchimentos obtêm-se melhores propriedades. Contudo, os resultados experimentais obtidos mostram que é possível obter propriedades idênticas com preenchimentos inferiores se os restantes parâmetros estiverem em harmonia. Algumas combinações com meno-

res percentagens de preenchimento obtiveram melhores propriedades mecânicas quando comparadas com algumas combinações com maior preenchimento, reduzindo desta forma também o tempo de impressão. Esta conclusão torna-se deveras importante para empresas que trabalhem com fabrico aditivo diariamente pois, apesar de melhorarem as propriedades das peças impressas, ainda conseguem diminuir o tempo de fabrico, conseguindo uma vantagem no mercado.

A melhor resistência à tração foi obtida com uma espessura da camada de 0,1 mm, um ângulo de preenchimento de 0°, uma largura da camada de 0,4 mm e um preenchimento de 100%.

Através da comparação das propriedades mecânicas obtidas pela tecnologia FFF e por injeção, percebeu-se que a resistência à tração diminui 9,31%, enquanto que a deformação melhorou e o módulo de Young se preservou.

Com a utilização de camadas envolventes nos provetes, a percentagem de preenchimento real torna-se diferente ao valor inserido no software. Calcularam-se os valores reais deste parâmetro para várias combinações, onde algumas obtiveram desvios elevados e dispare, variando desde 2,56% até 23,96%. Esta diferença pode ser causada por diversas questões, tais como o ângulo de preenchimento, largura da camada, espessuras reais e a precisão do equipamento.

Acerca dos modelos de previsão, a lei das misturas obteve previsões próximas dos resultados obtidos experimentalmente. No entanto, analisando de uma forma geral, as redes neuronais artificiais mostraram ser a melhor maneira de prever as propriedades mecânicas das peças impressas, caso os valores ensinados à rede não apresentem grandes desvios padrão.

A presente dissertação mostra a importância de uma compreensão detalhada dos parâmetros relacionados, tanto com o processo, como com o próprio material, constituindo um aspeto preponderante na redução dos custos.

7.2 Trabalhos Futuros

Percebendo a importância deste estudo e desta tecnologia atualmente, são vários os trabalhos possíveis de realizar no futuro e com elevada relevância. Alguns possíveis trabalhos futuros relacionados com a presente dissertação são:

Estudo de outros parâmetros

São vários os parâmetros de impressão que têm um papel preponderante nas propriedades finais das peças impressas por FFF, sendo importante estudar outros parâmetros. A temperatura de extrusão é apenas um exemplo desses parâmetros, uma vez que interfere na adesão entre camadas podendo provocar a uma possível alteração das propriedades finais pretendidas.

Análise interna das peças impressas

A forma como o material é depositado e como ocorre a adesão entre as camadas, são aspetos difíceis de perceber apenas com os testes de tração realizados. Utilizando a microscopia ótica, existe a possibilidade de perceber detalhadamente aspetos com importância nas propriedades mecânicas das peças.

Simulação numérica para previsão

Apesar da utilização das redes neuronais apresentarem valores próximos dos obtidos experimentalmente, torna-se necessário realizar mais ensaios experimentais para conseguir treinar convenientemente a rede. O recurso à simulação numérica poderá ser uma mais valia para prever as propriedades mecânicas das peças impressas e reduzir custos.

Otimização dos parâmetros de impressão

Peças produzidas por fabrico aditivo utilizadas diariamente, são mais complexas do que a geometria estudada (provete). A escolha correta dos parâmetros de impressão, consoante a peça a fabricar, seria um caminho interessante a seguir.

Utilização de materiais com nanopartículas

Sendo a adição de nanopartículas em matrizes poliméricas uma abordagem também bastante utilizada no melhoramento das propriedades mecânicas dos materiais, seria interessante estudar a influência dos parâmetros de impressão para materiais reforçados com nanopartículas.

Bibliografia

- [1] American Society for Testing and Materials. (2015, 30 Dezembro). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies* [Em linha]. Disponível em: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>
- [2] R. K. Chen, Y. Jin, J. Wensman, A. Shih, “Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses - A review,” *Additive Manufacturing*, vol. 12, pp. 77-89, 2016.
- [3] Royal Academy of Engineering. (2015, 20 Dezembro). Additive manufacturing: opportunities and constraints [Em linha]. pp. 1-36, 2013. Disponível em: <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/additive-manufacturing>
- [4] I. Campbell, D. Bourell, I. Gibson, “Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age,” *Rapid Prototyping Journal*, pp. 255-258, 2012.
- [5] T. Wohlers, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins, CO: Wohlers Associates, Inc., 2014.
- [6] K. V. Wong, A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *International Scholarly Research Network*, vol. 2012, pp. 1-11, Junho 2012.
- [7] Q. Shi, D. Gu, M. Xia, S. Cao, T. Rong, “Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites,” *Optics & Laser Technology*, vol. 84, pp. 9-22, 2016.
- [8] A. Goyanes, U. Det-Amornrat, J. Wang, A. W. Basit, S. Gaisford, “3D scanning and 3D printing as innovative technologies for fabricating personalized topical drug delivery systems,” *Journal of Controlled Release*, vol. 234, pp. 41-48, 2016.
- [9] J. Vaithilingam, E. Prina, R. D. Goodridge, R. J. M. Hague, S. Edmondson, F. R. A. J. Rose, S. D. R. Christie, “Surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated using selective laser melting for biomedical applications,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 67, pp. 294-303, 2016.
- [10] S. Naghieh, M. R. K. Ravari, M. Dabrossamay, E. Foroozmehr, M. Kadkhodaei, “Numerical investigation of the mechanical properties of the additive manufactured bone scaffolds fabricated by FDM: The effect of layer penetration and post-heating,” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 59, pp. 241-250, 2016.
- [11] K. S. Lakshmi, G. Arumaikkannu, “Influence of Process Parameters on Tensile Strength of Additive Manufactured Polymer Parts Using Taguchi Method,” *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, 2017.

- [12] Z. Hu, H. Zhu, H. Zhang, X. Zeng, "Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel," *Optics & Laser Technology*, vol. 87, pp. 17-25, 2017.
- [13] Y. Ding, R. Dwivedi, R. Kovacevic, "Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 44, pp. 67-76, 2017.
- [14] Patentes (2016, 15 Setembro). *Shaped body especially prototype or replacement part production (DE 19649865 C)* [Em linha]. Disponível em: <https://www.google.com/patents/DE19649865C1?cl=en>
- [15] C. K. Chua, K. F. Leong, C. S. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications* ed. 2^a. World Scientific, 2003.
- [16] LUXeXceL. (2016, 15 Janeiro). *STL Model* [Em linha]. Disponível em: <https://www.luxexcel.com/stl-model/>
- [17] American Society for Testing and Materials. (2016, 15 Janeiro). *Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)* [Em linha].
- [18] F. P. W. Melchels, J. Feijen, D. W. Grijpma, "A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering," *Biomaterials*, vol. 31, pp. 6121-6130, Abril 2010.
- [19] MYOBJECTIFY. (2016, 25 Janeiro). Additive Manufacturing [Em linha]. Disponível em: <http://myobjectify.com/additive>
- [20] F. A. C. Alves. *Análise e Otimização do Processo Fused Filament Fabrication*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2014.
- [21] Carbon3D. (2016, 15 Setembro). *Carbon3D, Inc.* [Em linha]. Disponível em: <http://carbon3d.com/>
- [22] Carbon3D. (2016, 29 Julho). *Our process* [Em linha]. Disponível em: <http://carbon3d.com/clip-process>
- [23] J. R. Tumbleston, D. Shirvanyants, N. Ermoshkin, R. Januszewicz, A. R. Johnson, D. Kelly, K. Chen, R. Pinschmidt, J. P. Rolland, A. Ermoshkin, E. T. Samulski, J. M. DeSimone, "Continuous liquid interface production of 3D objects," *Science*, vol. 347, pp. 1349-1352, Março 2015.
- [24] L. E. Loh, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, M. Mapar, S. L. Sing, C. K. Chua, W. Y. Yeong, "Selective laser melting of aluminium alloy using a uniform beam profile," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, pp. 11-16, 2014.
- [25] SpaceX. (2016, 15 Setembro). *SpaceX* [Em linha]. Disponível em: <http://www.spacex.com/>
- [26] SpaceX. (2016, 25 Agosto). *SpaceX launches 3D-printed part to space, creates printed engine chamber* [Em linha]. Disponível em: <http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed>

- [27] NASA. (2016, 25 Agosto). *Successful NASA Rocket Fuel Pump Tests Pave Way for 3-D Printed Demonstrator Engine* [Em linha]. Disponível em: <http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2015/successful-nasa-rocket-fuel-pump-tests-pave-way-for-3-d-printed-demonstrator-engine.html>
- [28] Brian Krassenstein. (2016, 25 Agosto). *20,000 3D Printed Parts Are Currently Used on Boeing Aircraft as Patent Filing Reveals Further Plans* [Em linha]. Disponível em: <https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/>
- [29] Kira. (2016, 25 Agosto). *Alcoa to supply Airbus with metal 3D printed airplane parts* [Em linha]. Disponível em: <http://www.3ders.org/articles/20160407-alcoa-to-supply-airbus-with-metal-3d-printed-airplane-parts.html>
- [30] Michelle Matisons. (2016, 25 Agosto). *3D Printing to Help Reconstruct Skull of Woman with Multiple Brain Tumors* [Em linha]. Disponível em: <https://3dprint.com/104316/3d-print-skull-reconstruction/>
- [31] 3D Printing. (2016, 28 Janeiro). *3D printing techniques for Dental products* [Em linha]. Disponível em: <http://3dprinting.com/products/dental/3d-printing-dental-products/>
- [32] CUSTOMPART.NET. (2016, 28 Janeiro). *3D Printing* [Em linha]. Disponível em: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [33] J. Cesarano III, "A review of robocasting technology," *Solid Freeform and Additive Fabrication a Materials*, vol. 542, pp. 133-139, 1999.
- [34] J. Lewis, J. Smay, J. Stuecker, J. Cesarano III, "Direct Ink Writing of Three-Dimensional Ceramic Structures," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 89, pp. 3599-3609, 2006.
- [35] T. Wohlers, *Wohlers Report 2016 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins, CO: Wohlers Associates, Inc., 2016.
- [36] Stratasys. (2016, 15 Setembro). *3D Printing Solutions / Stratasys* [Em linha]. Disponível em: <http://www.stratasys.com/>
- [37] Stratasys. (2016, 28 Janeiro). *FDM Technology* [Em linha]. Disponível em: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
- [38] RepRap. (2016, 28 Janeiro). *RepRap* [Em linha]. Disponível em: <http://reprap.org/>
- [39] RepRage. (2016, 28 Janeiro). *Why did RepRap pick FDM and not another 3D printing technique?* [Em linha]. Disponível em: <http://reprage.com/post/44316648000/why-did-reprap-pick-fdm-and-not-another-3d-printing>
- [40] Y. S. Dambatta, A. A. D. Sarhan, "Surface Roughness Analysis, Modelling and Prediction in Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing Technology," *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, vol. 10, pp. 1486-1493, 2016.

- [41] M. V. S. Casagrande. (2016, 3 Fevereiro). *Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM*.
- [42] N. Lievendag. (2016, 3 Fevereiro). *3D Printing Filament Guide: ABS vs PLA vs many materials* [Em linha]. Disponível em: <http://nicklievendag.com/filament-guide/>
- [43] S. Dul, L. Fambri, A. Pegoretti, “Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites,” *Composites: Part A*, vol. 85, pp. 181-191, Março 2016.
- [44] G. Postiglione, G. Natale, G. Griffini, M. Levi, S. Turri, “Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling,” *Composites: Part A*, vol. 76, pp. 110-114, Maio 2015.
- [45] Stratasys. (2016, 28 Janeiro). *Stratasys 3D Printing Keeps NASA Satellite On Time and On Budget - FDM Strong Enough for Space* [Em linha]. Disponível em: <http://blog.stratasys.com/2015/02/12/nasa-3d-printing-fortus/>
- [46] M. K. Agarwala, V. R. Jamalabad, N. A. Langrana, A. Safari, P. J. Whalenm, S. C. Danforth, “Structural quality of parts processed by fused deposition,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 2, pp. 4-19, 1996.
- [47] L. C. Magalhães, N. Volpato, M. Luersen, “Build Parameters Influence on FDM Parts Mechanical Behavior,” 21th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, October 2011.
- [48] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, pp. 248-257, 2002.
- [49] B. M. Tymrak, M. Kreiger, J. M. Pearce, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,” *Materials and Design*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.
- [50] G. C. Onwubolu, F. Rayegani, “Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process,” *International Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 2014, pp. 1-13, Novembro 2014.
- [51] A. Bagsik, V. Schöppner, “Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with ULTEM 9085,” *Proceeding of ANTEC*, pp. 1294-1298, 2011.
- [52] RepRap. (2016, 16 Setembro). *Mendel* [Em linha]. Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Mendel>
- [53] RepRap. (2016, 16 Setembro). *Prusa Mendel (iteration 2)* [Em linha]. Disponível em: [http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_\(iteration_2\)](http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel_(iteration_2))
- [54] RepRap. (2016, 16 Setembro). *LulzBot/Prusa Mendel* [Em linha]. Disponível em: http://reprap.org/wiki/LulzBot/Prusa_Mendel
- [55] RepRap. (2016, 16 Setembro). *MOST RepRap* [Em linha]. Disponível em: http://reprap.org/wiki/MOST_RepRap

- [56] O. S. Carneiro, A. F. Silva, R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 768-776, Junho 2015.
- [57] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao, "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS," *Materials*, vol. 8, pp. 5834-5846, Setembro 2015.
- [58] M. Dawoud, I. Taha, S. J. Ebeid, "Mechanical behaviour of ABS : An experimental study using FDM and injection moulding techniques," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 39-45, Novembro 2015.
- [59] V. B. Nidagundi, R. Keshavamurthy, C. P. S. Prakash, "Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process," *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, pp. 1691-1699, 2015.
- [60] B. Wittbrodt, J. M. Pearce, "The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components," *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 110-116, Outubro 2015.
- [61] C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian, "Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling," pp. 159-180, 2012.
- [62] C. S. Lee, S. G. Kim, H. J. Kim, S. H. Ahn, "Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187-188, pp. 627-630, 2007.
- [63] K. G. J. Christiyen, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu, "A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 114, 2016.
- [64] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Materials and Design*, vol. 31, pp. 287-295, 2010.
- [65] J. D. T. Ferreira. Preparação e caracterização de compósitos de PEBD reforçados com pó de cortiça e de caroço de azeitona, para aplicações na construção civil. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [66] FoardPANEL. (2016, 28 Julho). *Open Vs. Closed Cell Foams* [Em linha]. Disponível em: <http://www.foardpanel.com/open-vs-closed-cell-foams/>
- [67] L. J. Gibson, M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, ed 2^a. Cambridge University Press, 1997.
- [68] A. E. Simone, L. J. Gibson, "Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams," *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 2139-2150, 1988.
- [69] Alyuda. (2016, 17 Setembro). *Neural network applications* [Em linha]. Disponível em: <http://www.al-yuda.com/products/forecaster/neural-network-applications.htm>

- [70] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, “Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,” *Journal of Advanced Research*, vol. 3, pp. 81-90, 2012.
- [71] General, “Artificial Neural Networks,” *Wikibook*, vol. 1, 2013.
- [72] D. Kriesel. (2016, 5 Julho). A Brief Introduction to Neural Networks [Livro]. Disponível em: http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks
- [73] R. K. Roy, *Design of Experiments using the taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [74] BEEVERYCREATIVE. (2016, 13 Março). *BEESUPPLIES* [Em linha]. Disponível em: <https://beeverycreative.com/beesupplies/>
- [75] BEEVERYCREATIVE. (2016, 13 Março). *BEETHEFIRST+* [Em linha]. Disponível em: <https://beeverycreative.com/beethefirst-plus/>
- [76] BEEVERYCREATIVE. (2016, 13 Março). *BEESOFT - BEE 3D PRINTER'S SOFTWARE* [Em linha]. Disponível em: <https://beeverycreative.com/beesoft/>
- [77] A. N. M. R. Costa. Nanocompósitos de matriz polimérica para impressão 3D. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2016.
- [78] Plastics - Determination o tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics, British Standard EN ISO 527-2:1996 BS 2782-3: Method 322:1994, London South Bank University, 2006.
- [79] MathWorks. (2016, 11 Julho). *Fit Data with a Neural Network* [Em linha]. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/nnet/gs/fit-data-with-a-neural-network.html>
- [80] Prof. Ian R. Grosse. (2016, 1 Junho). *Chapter 5: Implementation of integrated approach for the development of infinite software* [Em linha]. Disponível em: <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/mda/fea/sankar/chap5.html>
- [81] Minitab 17 Support. (2016, 1 Junho). *What is the signal-to-noise ratio in a Taguchi design?* [Em linha]. Disponível em: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/taguchi-designs/what-is-the-signal-to-noise-ratio/>

Apêndice A

Gráficos de Tensão-Deformação para Diferentes Ângulos de Orientação

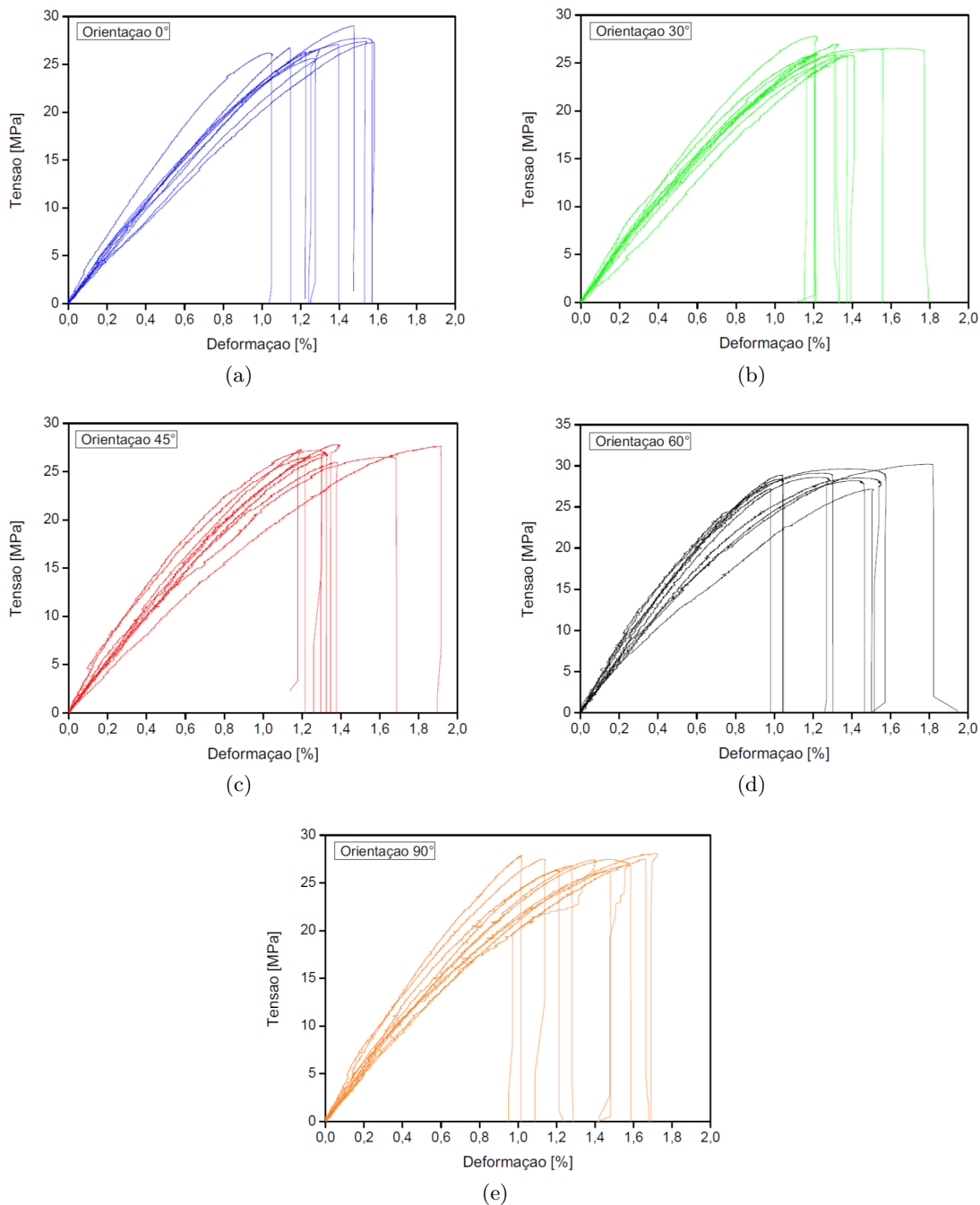


Figura A.1: Curvas Tensão-Deformação dos diferentes ensaios de tração realizados para provetes impressos seguindo diferentes orientações: (a) 0°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 90°.

Apêndice B

Desenho Esquemático Relativo às Camadas Envolventes dos Provetes

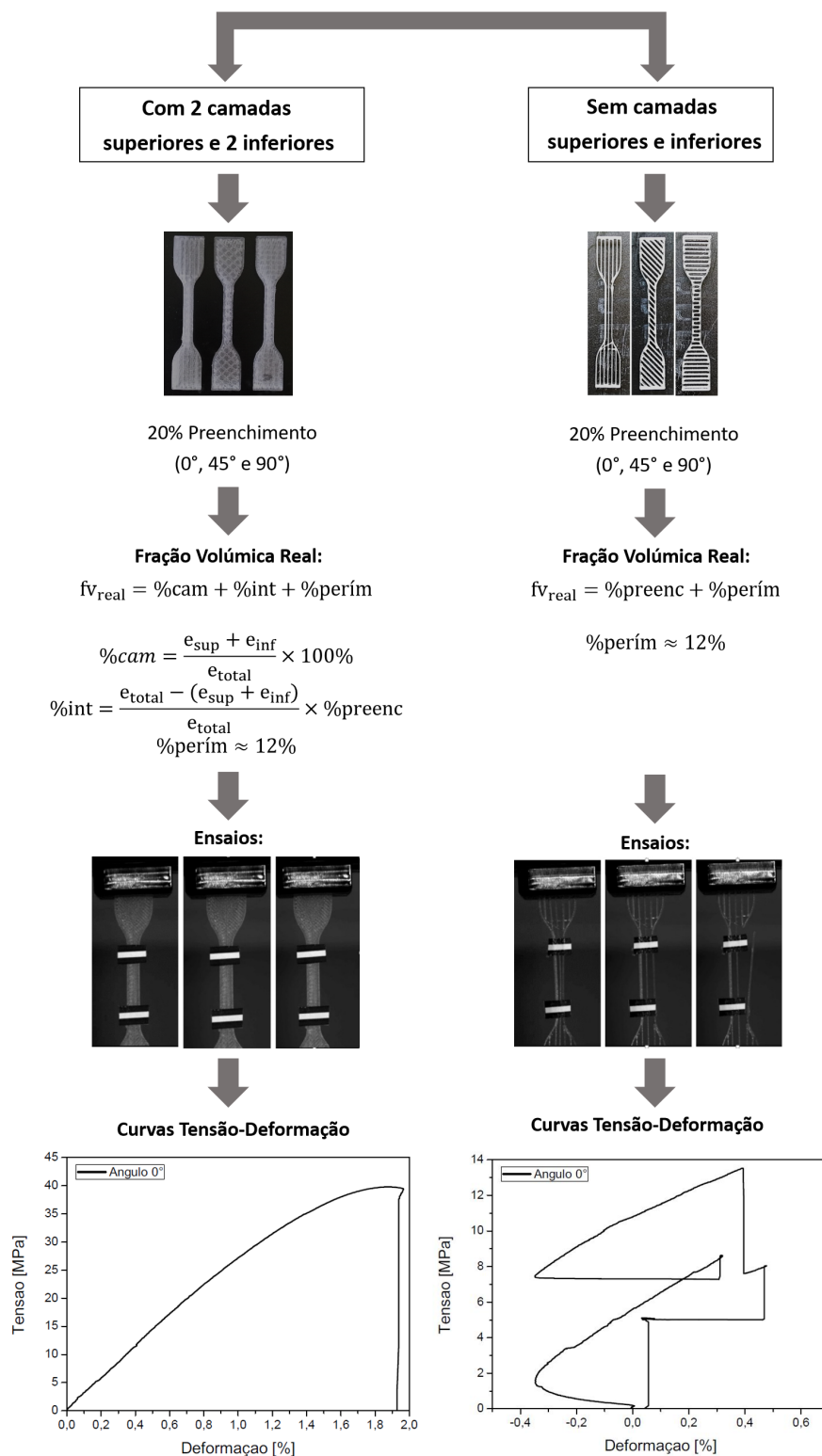


Figura B.1: Desenho esquemático do fluxo experimental realizado.

Apêndice C

Análise do Método de Taguchi

A análise do método de Taguchi, consiste em analisar os resultados de forma eficiente das combinações criadas pelo mesmo. As Tabelas C.1 e C.2 apresentam as combinações criadas pelo método em questão e os resultados estudados, respectivamente.

Tabela C.1: Matriz ortogonal L9.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]
C1	0,10	0	0,40	20
C2	0,10	-45/45	0,48	60
C3	0,10	0/90	0,56	100
C4	0,20	0	0,48	100
C5	0,20	-45/45	0,56	20
C6	0,20	0/90	0,40	60
C7	0,30	0	0,56	60
C8	0,30	-45/45	0,40	100
C9	0,30	0/90	0,48	20

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento

C: Largura da Camada; D: Preenchimento

Tabela C.2: Valores de resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young, para diferentes combinações.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C1	27,91 ± 1,895	2,13 ± 0,151	1,93 ± 0,039
C2	35,35 ± 2,317	2,90 ± 0,178	2,59 ± 0,310
C3	54,15 ± 1,550	3,10 ± 0,358	3,53 ± 0,203
C4	52,44 ± 2,224	4,46 ± 0,179	3,90 ± 0,189
C5	33,80 ± 1,393	2,78 ± 0,249	2,55 ± 0,161
C6	42,15 ± 0,217	2,21 ± 0,071	3,51 ± 0,158
C7	49,45 ± 1,197	3,37 ± 0,439	3,45 ± 0,192
C8	50,94 ± 1,731	3,64 ± 0,189	3,58 ± 0,183
C9	39,68 ± 0,375	2,50 ± 0,124	2,64 ± 0,313

C.1 Valor Médio de Cada Nível

Inicia-se a análise, determinando o valor médio de cada nível de uma variável em particular, que é calculado pela soma dos parâmetros de processo referentes a um nível individual (Eq. C.1).

$$\mu_{vl} = \frac{(p_a + p_b + p_c)}{n} \quad (\text{C.1})$$

- μ_{vl} é o valor médio do nível l do parâmetro v;
- p é o valor obtido nas combinações;
- n é o número de combinações;
- a, b e c são os índices correspondentes às combinações a, b e c, respetivamente.

Para melhor compreensão, no caso da matriz ortogonal L9 do presente estudo, o valor médio do nível 2 (0,2 mm) para a variável 1 (espessura da camada) é obtido através da Equação C.2.

$$\mu_{12} = \frac{(p_4 + p_5 + p_6)}{3} \quad (\text{C.2})$$

C.1.1 Combinações com 0,1 mm de Espessura da Camada

A Tabela C.3 apresenta as combinações com uma espessura da camada de 0,1 mm, enquanto que na Tabela C.4 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.3: Combinações para os provetes com 0,1 mm de espessura.

Combinação	Ângulo P. [°]	Largura [mm]	Preenchimento [%]
C1	0	0,4	20
C2	-45/45	0,48	60
C3	0/90	0,56	100

Tabela C.4: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,1 mm de espessura.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C1	27,91	2,13	1,93
C2	35,35	2,90	2,59
C3	54,15	3,10	3,53
μ_{11}	39,14	2,71	2,68

C.1.2 Combinações com 0,2 mm de Espessura da Camada

A Tabela C.5 apresenta as combinações com uma espessura da camada de 0,2 mm, enquanto que na Tabela C.6 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.5: Combinações para os provetes com 0,2 mm de espessura.

Combinação	Ângulo P. [°]	Largura [mm]	Preenchimento [%]
C4	0	0,48	100
C5	-45/45	0,56	20
C6	0/90	0,4	60

Tabela C.6: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,2 mm de espessura.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C4	52,44	4,46	3,90
C5	33,80	2,78	2,55
C6	42,15	2,21	3,51
μ_{12}	42,80	3,15	3,32

C.1.3 Combinações com 0,3 mm de Espessura da Camada

A Tabela C.7 apresenta as combinações com uma espessura da camada de 0,3 mm, enquanto que na Tabela C.8 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.7: Combinações para os provetes com 0,3 mm de espessura.

Combinação	Ângulo P. [°]	Largura [mm]	Preenchimento [%]
C7	0	0,56	60
C8	-45/45	0,4	100
C9	0/90	0,48	20

Tabela C.8: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,3 mm de espessura.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C7	49,45	3,37	3,45
C8	50,94	3,64	3,58
C9	39,68	2,50	2,64
μ_{13}	46,69	3,17	3,23

C.1.4 Combinações com 0°

A Tabela C.9 apresenta as combinações com um ângulo de preenchimento de 0° , enquanto que na Tabela C.10 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.9: Combinações para os provetes com 0° de ângulo de preenchimento.

Combinação	Espessura [mm]	Largura [mm]	Preenchimento [%]
C1	0,1	0,4	20
C4	0,2	0,48	100
C7	0,3	0,56	60

Tabela C.10: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0° de ângulo de preenchimento.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C1	27,91	2,13	1,93
C4	52,44	4,46	3,90
C7	49,45	3,37	3,45
μ_{21}	43,27	3,32	3,09

C.1.5 Combinações com -45°/45°

A Tabela C.11 apresenta as combinações com ângulos de preenchimento de -45° / 45° , enquanto que na Tabela C.12 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.11: Combinações para os provetes com -45°/45° de ângulo de preenchimento.

Combinação	Espessura [mm]	Largura [mm]	Preenchimento [%]
C2	0,1	0,48	60
C5	0,2	0,56	20
C8	0,3	0,4	100

Tabela C.12: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com -45°/45° de ângulo de preenchimento.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C2	35,35	2,90	2,59
C5	33,80	2,78	2,55
C8	50,94	3,64	3,58
μ_{22}	40,03	3,11	2,91

C.1.6 Combinações com 0°/90°

A Tabela C.13 apresenta as combinações com ângulos de preenchimento de 0°/ 90°, enquanto que na Tabela C.14 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.13: Combinações para os provetes com 0°/90° de ângulo de preenchimento.

Combinação	Espessura [mm]	Largura [mm]	Preenchimento [%]
C3	0,1	0,56	100
C6	0,2	0,4	60
C9	0,3	0,48	20

Tabela C.14: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0°/90° de ângulo de preenchimento.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C3	54,15	3,10	3,53
C6	42,15	2,21	3,51
C9	39,68	2,50	2,64
μ_{23}	45,33	2,60	3,23

C.1.7 Combinações com 0,4 mm de Largura da Camada

A Tabela C.15 apresenta as combinações com uma largura da camada de 0,4 mm, enquanto que na Tabela C.16 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.15: Combinações para os provetes com 0,4 mm de largura.

Combinação	Espessura [mm]	Ângulo P. [°]	Preenchimento [%]
C1	0,1	0	20
C6	0,2	0/90	60
C8	0,3	-45/45	100

Tabela C.16: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,4 mm de largura.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C1	27,91	2,13	1,93
C6	42,15	2,21	3,51
C8	50,94	3,64	3,58
μ_{31}	40,33	2,66	3,00

C.1.8 Combinações com 0,48 mm de Largura da Camada

A Tabela C.17 apresenta as combinações com uma largura da camada de 0,48 mm, enquanto que na Tabela ?? estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.17: Combinações para os provetes com 0,48 mm de largura.

Combinação	Espessura [mm]	Ângulo P. [°]	Preenchimento [%]
C2	0,1	-45/45	60
C4	0,2	0	100
C9	0,3	0/90	20

Tabela C.18: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,48 mm de largura.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C2	35,35	2,90	2,59
C4	52,44	4,46	3,90
C9	39,68	2,50	2,64
μ_{32}	42,49	3,29	3,04

C.1.9 Combinações com 0,56 mm de Largura da Camada

A Tabela C.19 apresenta as combinações com uma largura da camada de 0,56 mm, enquanto que na Tabela C.20 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.19: Combinações para os provetes com 0,56 mm de largura.

Combinação	Espessura [mm]	Ângulo P. [°]	Preenchimento [%]
C3	0,1	0/90	100
C5	0,2	-45/45	20
C7	0,3	0	60

Tabela C.20: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 0,56 mm de largura.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C3	54,15	3,10	3,53
C5	33,80	2,78	2,55
C7	49,45	3,37	3,45
μ_{33}	45,80	3,08	3,18

C.1.10 Combinações com 20% de Preenchimento

A Tabela C.21 apresenta as combinações com um preenchimento de 20 %, enquanto que na Tabela C.22 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.21: Combinações para os provetes com 20% de preenchimento.

Combinação	Espessura [mm]	Ângulo P. [°]	Largura [mm]
C1	0,1	0	0,4
C5	0,2	-45/45	0,56
C9	0,3	0/90	0,48

Tabela C.22: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 20% de preenchimento.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C1	27,91	2,13	1,93
C5	33,80	2,78	2,55
C9	39,68	2,50	2,64
μ_{41}	33,80	2,47	2,37

C.1.11 Combinações com 60% de Preenchimento

A Tabela C.23 apresenta as combinações com um preenchimento de 20 %, enquanto que na Tabela C.24 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.23: Combinações para os provetes com 60% de preenchimento.

Combinação	Espessura [mm]	Ângulo P. [°]	Largura [mm]
C2	0,1	-45/45	0,48
C6	0,2	0/90	0,4
C7	0,3	0	0,56

Tabela C.24: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 60% de preenchimento.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C2	35,35	2,90	2,59
C6	42,15	2,21	3,51
C7	49,45	3,37	3,45
μ_{42}	42,32	2,83	3,18

C.1.12 Combinações com 100% de Preenchimento

A Tabela C.25 apresenta as combinações com um preenchimento de 20 %, enquanto que na Tabela C.26 estão presentes os valores médios para os *outputs* estudados.

Tabela C.25: Combinações para os provetes com 100% de preenchimento.

Combinação	Espessura [mm]	Ângulo P. [°]	Largura [mm]
C3	0,1	0/90	0,56
C4	0,2	0	0,48
C8	0,3	-45/45	0,4

Tabela C.26: Valores médios da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young para provetes com 100% de preenchimento.

Combinação	Resistência à tração [MPa]	D. de rutura [%]	M. de Young [GPa]
C3	54,15	3,10	3,53
C4	52,44	4,46	3,90
C8	50,94	3,64	3,58
μ_{43}	52,51	3,73	3,67

C.2 Soma do Valor Quadrado dos Parâmetros

A soma do valor quadrado dos parâmetros (SS) é definida como medida da variabilidade de cada parâmetro, sendo calculada utilizando a Equação C.3 ou C.4.

$$SS_v = \sum_{j=1}^L [\bar{\mu} - \mu_{vj}]^2 \quad (C.3)$$

$$SS_v = \frac{\sum_{j=1}^L [\mu_y * L]^2}{R} - \frac{[T]^2}{N} \quad (C.4)$$

- L é o número de níveis;
- N é o número de combinações;
- R é o número de repetições por nível;
- T é a soma dos resultados obtidos em todas as combinações;
- $\bar{\mu}$ é a média dos valores médios de cada nível de uma variável.

Para melhor compreensão, no caso da matriz ortogonal L9 do presente estudo, a soma do valor quadrado da variável (espessura da camada) pode ser obtida através da Equação C.5 ou C.6. A Tabela C.27 apresenta os valores calculados para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de elasticidade, para cada parâmetro.

$$SS_1 = [\bar{\mu} - \mu_{11}]^2 + [\bar{\mu} - \mu_{12}]^2 + [\bar{\mu} - \mu_{13}]^2 \quad (C.5)$$

$$SS_v = \frac{(p_1 + p_2 + p_3)^2 + (p_4 + p_5 + p_6)^2 + (p_7 + p_8 + p_9)^2}{3} - \frac{\left(\sum_{i=1}^9 p_i\right)^2}{9} \quad (C.6)$$

Tabela C.27: Soma do valor quadrado da espessura da camada, ângulo de preenchimento, largura da camada e percentagem de preenchimento.

Propriedade	SS_1	SS_2	SS_3	SS_4
Resistência à tração	85,54	42,80	45,56	526,76
Deformação de rutura	0,41	0,81	0,61	2,54
Módulo de Young	0,71	0,16	0,05	2,58

C.3 Soma Total dos Quadrados

A soma total dos quadrados (SST), é a soma dos desvios dos parâmetros estudados do valor médio das combinações experimentais. Esta pode ser obtida através das Equações C.7 ou C.8. A Tabela C.28 indica a soma total dos quadrados obtida para as diferentes propriedades estudadas.

$$SST = \sum_{k=1}^N [p_i - \bar{\mu}]^2 \quad (C.7)$$

$$SST = \sum_{k=1}^N [p_i]^2 - \frac{[T]^2}{N} \quad (C.8)$$

Tabela C.28: Soma total dos quadrados.

Combinação	Resistência à tração	$(p_i - \bar{\mu})^2$ D. de rutura	Módulo de Young
C1	223,97	0,78	1,32
C2	56,64	0,01	0,24
C3	127,25	0,01	0,21
C4	91,50	2,09	0,68
C5	82,30	0,05	0,28
C6	0,52	0,64	0,19
C7	43,25	0,13	0,14
C8	65,00	0,40	0,26
C9	10,23	0,26	0,19
$\bar{\mu}$	42,87	3,01	3,08
SST	700,66	4,36	3,50

C.4 Contribuição Percentual

A contribuição percentual de cada variável é a razão dada pela soma dos quadrados de cada variável sobre a soma total dos quadrados. Este valor indica a influência da variável em causa devido aos diferentes níveis existentes. Este valor está apresentado na Tabela C.29.

Tabela C.29: Contribuição percentual das variáveis.

Propriedade	Espessura	Contribuição Percentual		
		Ângulo P	Largura	Preenchimento
Resistência à tração	0,12	0,06	0,07	0,75
Deformação de rutura	0,09	0,19	0,14	0,58
Módulo de Young	0,20	0,05	0,01	0,74

C.5 Valor Próximo do Nível Ideal

Com o objetivo de encontrar o valor próximo do ideal, é definido o melhor nível de cada variável em estudo. Estes valores podem ser encontrados facilmente a partir dos valores médios de todos os níveis. Nos gráficos das Figuras C.1, C.2 e C.3 estão representados as influências dos diferentes níveis das variáveis estudadas na obtenção da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de young. Por sua vez, as Tabelas C.30, C.31 e C.32 apresentam os níveis dos diferentes parâmetros que obtêm os melhores resultados da resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young, respectivamente.

Como se trata da variação de quatro parâmetros simultaneamente, torna-se imperativo minimizar alguns efeitos de ruído existentes. A relação sinal-ruído mede a forma de como a resposta varia em relação ao valor pretendido, em diferentes condições de ruído. Existindo diversas relações sinal-ruído, é necessário escolher a que melhor se enquadra [81]. No presente estudo pretende-se maximizar os valores de resistência à tração e do módulo de Young. Assim, a relação sinal-ruído adequada é a *larger is better* por forma a maximizar a resposta (Eq. C.9). Por sua vez, na deformação de rutura a relação utilizada passa pela *smaller is better*, visto que se pretende minimizar deformação de rutura (Eq. C.10).

$$S/N = -10 \times \log \left(\sum \left(\frac{1}{\mu_{vl}^2} \right) / n \right) \quad (C.9)$$

$$S/N = -10 \times \log \left(\sum (\mu_{vl}^2) / n \right) \quad (C.10)$$

- S/N é relação sinal-ruído;
- μ_{vl} é o valor médio do nível l do parâmetro v;
- n é o número de combinações.

C.5.1 Resistência à Tração

Nos gráficos da Figura C.1 está representada a resistência à tração em função das variáveis e dos seus níveis. A Tabela C.30 indica a combinação de parâmetros que detém a melhor resistência à tração (CR), de acordo com a Figura C.1.

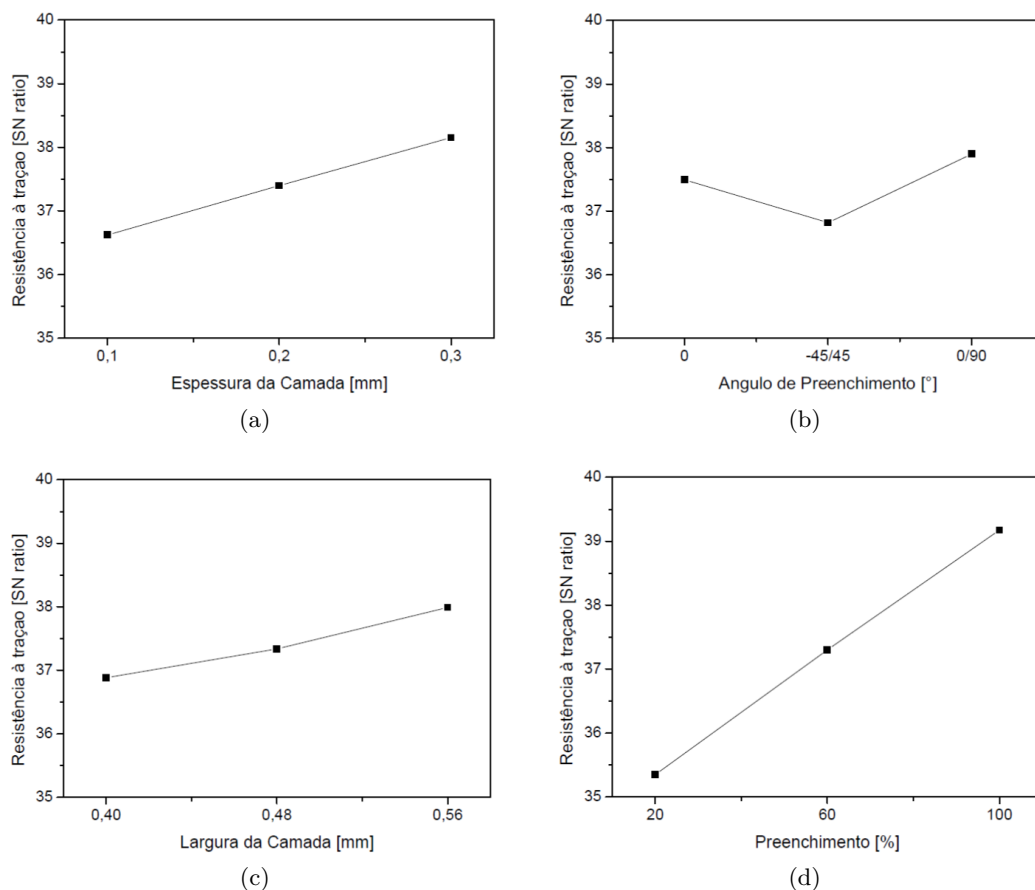


Figura C.1: Efeito dos diferentes níveis na Resistência à tração: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.

Tabela C.30: Valores próximo do ideal – Resistência à tração (CR).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,3
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,56
Preenchimento [%]	100

C.5.2 Deformação de Rutura

Nos gráficos da Figura C.2 está representada a deformação de rutura em função das variáveis e dos seus níveis. A Tabela C.31 indica a combinação de parâmetros que detém melhor deformação de rutura (CD), de acordo com a Figura C.2.

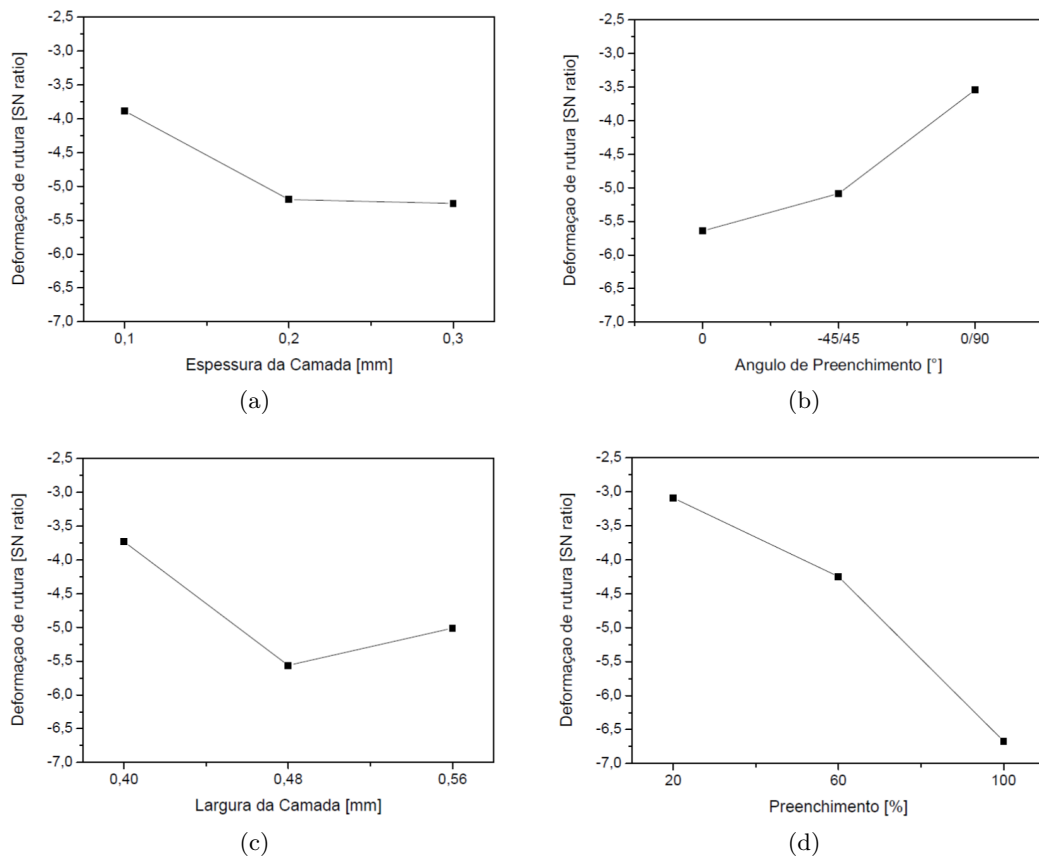


Figura C.2: Efeito dos diferentes níveis na Deformação de rutura: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.

Tabela C.31: Valores próximo do ideal – Deformação de rutura (CD).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,1
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,4
Preenchimento [%]	20

C.5.3 Módulo de Young

Nos gráficos da Figura C.3 está representada o módulo de Young em função das variáveis e dos seus níveis. A Tabela C.32 indica a combinação de parâmetros que detém o melhor módulo de Young (CMY), de acordo com a Figura C.3.

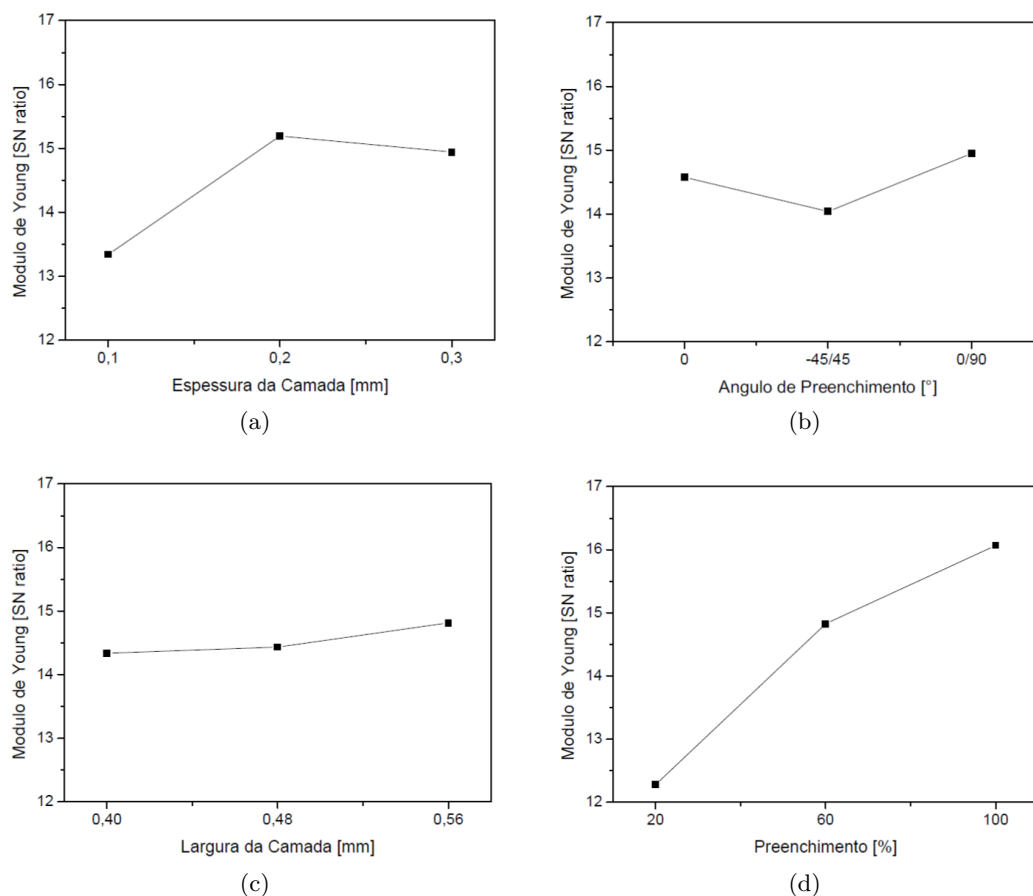


Figura C.3: Efeito dos diferentes níveis no Módulo de Young: (a) Espessura da Camada, (b) Ângulo de Preenchimento, (c) Largura da Camada, (d) Preenchimento.

Tabela C.32: Valores próximo do ideal – Módulo de Young (CMY).

Variável de Estudo	Valor
Espessura da Camada [mm]	0,2
Ângulo de Preenchimento [°]	0/90
Largura da Camada [mm]	0,56
Preenchimento [%]	100

C.6 Teste ANOVA (Análise da Variância)

É possível aferir, pela secção anterior quais as variáveis que têm um papel influente (através da contribuição percentual). No entanto, não é possível afirmar com certeza se os parâmetros são realmente influentes nas propriedades finais da peça. Fazendo uma análise da variância (ANOVA), pode-se aceitar ou rejeitar cada parâmetro a partir da análise do intervalo de confiança, através da realização do teste F.

De acordo com o teste F, a variável é significativa apenas se a relação da média da soma dos quadrados (MSV) com a média da soma do erro (MSE), F calculado, for superior ao valor de F crítico. Os valores de MSV e MSE podem ser determinados pelas Equações C.11 e C.12, respetivamente.

$$MSV = \frac{SS}{L - 1} \quad (C.11)$$

$$MSE = \frac{SST - SS}{N - L} \quad (C.12)$$

O valor de F calculado é baseado na abordagem estatística que obedece a uma distribuição F com L-1 graus de liberdade no numerador, N-L graus de liberdade no denominador e um intervalo de confiança. A hipótese para aceitar ou rejeitar o significado de uma variável é dada pelas regras abaixo.

H_0 : a variável em causa não é significativa;

H_a : a variável em causa é significativa.

Concluir H_0 se,

$$\frac{MSV}{MSE} \leq F(L - 1, N - L, \alpha) \quad (C.13)$$

Concluir H_a se,

$$\frac{MSV}{MSE} > F(L - 1, N - L, \alpha) \quad (C.14)$$

Sendo N=9, L=3 e $\alpha=0,05$ (confiança de 95%) calcula-se que o valor de F crítico é de 5,14. Estando o valor de F crítico calculado, calculou-se o valor F para todas as variáveis relacionado com a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young (Tab. C.33).

Analisando os valores de F calculados, constata-se que apenas a percentagem de preenchimento pode ser considerada significativa na obtenção das melhores propriedades mecânicas. Apesar das restantes variáveis mostrarem ter influência nos resultados, não são superiores ao F crítico.

Tabela C.33: Valor F calculado para as diferentes variáveis para a resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young.

Propriedade	Variável	MSV	MSE	F
Resistência à tração	Espessura da Camada	42,77	102,52	0,42
	Ângulo de Preenchimento	21,40	109,64	0,20
	Largura da Camada	22,78	109,18	0,21
	Percentagem de Preenchimento	263,38	28,98	9,09
Deformação de Rutura	Espessura da Camada	0,20	0,66	0,31
	Ângulo de Preenchimento	0,40	0,59	0,68
	Largura da Camada	0,31	0,63	0,49
	Percentagem de Preenchimento	1,27	0,30	4,18
Módulo de Young	Espessura da Camada	0,36	0,47	0,77
	Ângulo de Preenchimento	0,08	0,6	0,14
	Largura da Camada	0,03	0,58	0,04
	Percentagem de Preenchimento	263,38	28,98	9,09

C.7 Teste de Confirmação

É necessário ter em conta que, embora seja suposto a combinação dos valores próximos do ideal obter os melhores resultados, por vezes isso poderá não acontecer, sendo necessário realizar um teste de confirmação.

Como todas as variáveis foram estudadas em conjunto, poderá haver uma avaliação excessiva. Por isso, em vez de conceder um peso igual a todas variáveis, o peso de cada variável depende do significado de cada uma. De acordo com este procedimento, o valor estimado para a condição ótima é calculado através da Equação C.15, tendo em conta o coeficiente de relevância, β . Os resultados obtidos encontram-se na Tabela C.34.

$$\hat{\mu}_{\text{optimum}} = \bar{\mu} + \sum_{i=1}^{NV} \beta_i \times [(\mu_0)_i - \bar{\mu}] \quad (\text{C.15})$$

- NV é o número de variáveis.

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } \frac{MSV}{MSE} \leq 1 \\ 1 & \text{se } \frac{MSV}{MSE} > 1 \end{cases}$$

Tabela C.34: Valor estimado ótimo para resistência à tração, deformação de rutura e módulo de Young.

Propriedades	Variável	β	μ [MPa]	μ_0	$\hat{\mu}_{\text{optimum}}$ [MPa]
Resistência à tração	Espessura da Camada	0		46,69	
	Ângulo de Preenchimento	0	42,87	45,33	51,45
	Largura da Camada	0		45,80	
	Preenchimento	0,89		52,51	
Deformação de rutura	Espessura da Camada	0		3,17	
	Ângulo de Preenchimento	0	3,01	3,32	3,56
	Largura da Camada	0		3,29	
	Preenchimento	0,76		3,73	
Módulo de Young	Espessura da Camada	0		3,32	
	Ângulo de Preenchimento	0	3,08	3,23	3,60
	Largura da Camada	0		3,19	
	Preenchimento	0,88		3,67	

Apêndice D

Combinações Impressas e Respetivos Tempos

Tabela D.1: Combinações preconizadas e respetivos tempos de impressão.

Ensaio/Param	A [mm]	B [°]	C [mm]	D [%]	Tempo
C1	0,10	0	0,40	20	9 min 34 seg
C2	0,10	-45/45	0,48	60	12 min 06 seg
C3	0,10	0/90	0,56	100	12 min 42 seg
C4	0,20	0	0,48	100	6 min 30 seg
C5	0,20	-45/45	0,56	20	4 min 56 seg
C6	0,20	0/90	0,40	60	8 min 08 seg
C7	0,30	0	0,56	60	4 min 31 seg
C8	0,30	-45/45	0,40	100	6 min 49 seg
C9	0,30	0/90	0,48	20	4 min 56 seg
CR	0,30	0/90	0,56	100	4 min 57 seg
CD	0,10	0/90	0,4	20	8 min 50 seg
CMY	0,20	0/90	0,56	100	5 min 54 seg
C10	0,10	0	0,48	20	7 min 55 seg
C11	0,10	0	0,56	20	7 min 23 seg
C12	0,30	0	0,48	20	4 min 55 seg
C13	0,30	-45/45	0,48	20	5 min 34 seg
CB1	0,10	0	0,40	100	14 min 36 seg
CB2	0,10	-45/45	0,48	100	15 min 26 seg
CB5	0,20	-45/45	0,56	100	7 min 24 seg
CB6	0,20	0/90	0,40	100	9 min 23 seg
CB7	0,30	0	0,56	100	6 min 01 seg
CB9	0,30	0/90	0,48	100	7 min 23 seg
CBD	0,30	0/90	0,4	100	6 min 40 seg
CBMY	0,20	0	0,4	100	7 min 38 seg

A: Espessura da Camada; B: Ângulo de Preenchimento

C: Largura da Camada; D: Preenchimento